

Propulsión híbrida de una embarcación auxiliar

Trabajo final de grado



Facultad de Náutica de Barcelona
Universidad Politécnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Andrés Otano Alonso

Dirigido por:
Victor Fuses Navarra

Grado en Ingeniería de Sistemas y Tecnología Naval

Barcelona, fecha 09/04/2019

Departamento de Ingeniería eléctrica



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

Resumen

El alcance de este proyecto es diseñar y dimensionar un sistema propulsivo híbrido o eléctrico para una pequeña embarcación de recreo que pueda transportar a una persona adulta.

Para ayudar en el proceso de diseño, se ha recurrido al uso de varios softwares tanto de simulación como de diseño CAD. Esto ha permitido tener un conocimiento más fiable de las necesidades propulsivas de los modelos, así como estudiar el reparto de espacios y de pesos en la embarcación.

En base a esta información se ha realizado un estudio de mercado de los diferentes sistemas y componentes que utilizan la mayoría de productos como el de este proyecto. Se han buscado proveedores para los diferentes componentes que constituyen el sistema propulsivo final.

Durante el desarrollo del proyecto, se han realizado una serie de ensayos a un grupo electrógeno del que se dispone en la facultad ETSEIB de la Universidad, en base a los que se ha estimado la viabilidad de la elección hecha.

Finalmente, se recoge una propuesta del sistema de propulsión diseñado. Los componentes que lo conforman, la distribución que adoptaría en la embarcación en base al análisis de la estabilidad longitudinal de la embarcación y el precio final del prototipo.

Abstract

The main objective of the following Project is to develop a full-sized miniboat and its propulsion system. The purpose of this boat is to carry one passenger and navigate at 3.5 knots or more for at least half an hour.

CAD software and analysis and simulating software have been used in order to help in the development of the design. The information and data collected from these simulations helped to find out which component could fit better into the boat and to conform the main propulsion system.

The project will include a market study of different products that share some similarities with this project. Also each component will be chosen by its function into the propulsion system.

Some tests have been made to get functional characteristics from the generator set that will throw some data about the viability of installing such components in this project.

Finally, every component that will be part of the propulsion system will be recorded in a proposal, a distributor and price for each component either the final price of the propulsion system. At the end can be found all data from tests, simulations and about the components.

Tabla de contenidos

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
TABLA DE CONTENIDOS	6
TABLA DE ILUSTRACIONES	8
TABLA DE ILUSTRACIONES ANEXOS	10
ÍNDICE DE TABLAS	12
ÍNDICE DE TABLAS ANEXOS	13
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	15
1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS	16
CAPÍTULO II. LA EMBARCACIÓN. DIMENSIONES, CARACTERÍSTICAS Y NECESIDADES PROPULSIVAS.	17
1. MODELOS QUE HAN INSPIRADO EL PROYECTO	17
2. DATOS GENERALES DE LA EMBARCACIÓN	20
3. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES PROPULSIVAS DE LA EMBARCACIÓN	23
4. RESUMEN DEL CONTENIDO DEL CAPÍTULO II	25
CAPÍTULO III. PROPULSIÓN. MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y HÉLICES	26
1. MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA	27
2. MÁQUINA DE CORRIENTE ALTERNA	30
3. SELECCIÓN DEL MOTOR	33
4. HÉLICES	36
5. RESUMEN DEL CONTENIDO DEL CAPÍTULO III	39
6. FUTURAS LÍNEAS DE ESTUDIO Y DESARROLLO	40
CAPÍTULO IV. SISTEMAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	41
1. GRUPO ELECTRÓGENO	41

2. ENSAYOS REALIZADOS AL GRUPO ELECTRÓGENO	45
3. PLACAS SOLARES	54
4. PILA DE COMBUSTIBLE	58
5. RESUMEN DEL CONTENIDO DEL CAPÍTULO IV	61
CAPÍTULO V. ACUMULADORES ELÉCTRICOS. BATERÍAS, CONDENSADORES Y SUPERCONDENSADORES	62
1. BATERÍAS Y/O ACUMULADORES ELÉCTROQUÍMICOS	62
2. BMS (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM)	69
3. CONDENSADORES Y SUPERCONDENSADORES	73
4. SELECCIÓN DEL TIPO Y CARACTERÍSTICAS DEL ACUMULADOR	75
5. RESUMEN DEL CONTENIDO DEL CAPÍTULO V	77
6. FUTURAS LÍNEAS DE ESTUDIO Y DESARROLLO	78
CAPÍTULO VI. PROPUESTA FINAL	79
1. COMPONENTES DEL SISTEMA PROPULSIVO	79
2. COSTE DEL SISTEMA PROPULSIVO	82
3. DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPONENTES	84
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES	87
CONCLUSIONES DE LA PROPUESTA FINAL	87
CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS	87
CONCLUSIONES DEL PROYECTO	88
BIBLIOGRAFÍA	90
A1. ANEXO 1	93
A2. ANEXO 2	95
A2.1 DIMENSIONES Y COEFICIENTES QUE DEFINEN EL MODELO UTILIZADO EN LAS SIMULACIONES.	95
A2.2 DATOS DE ENTRADA Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN MAXSURF RESISTANCE.	97
A2.3 DATOS DE ENTRADA Y RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN MAXSURF STABILITY	99
A2.4 CROQUIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPONENTES EN EL PROTOTIPO.	104
A3. ANEXO 3	105
A3.1 RECOPIACIÓN DE ALGUNOS MOTORES Y CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES PROVEEDORES VISTOS	105
A3.2 LISTADO DE BATERÍAS VISTOS EN EL PROYECTO Y SUS PRINCIPALES DATOS DE FUNCIONAMIENTO	106
A3.3 INFORMACIÓN BATERÍA RITAR DC12-65 DE 70AH	107

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1: mini barca eléctrica Miniboat RapidWhale. (RapidWhale, Josh Tulberg)	17
Ilustración 2: SEABOB F5. (SEABOB Adventure)	18
Ilustración 3: LiftFoil e-Foil. (LiftFoil)	18
Ilustración 4: Yamaha SeaScooter 500 Li. (My SeaScooter Underwater Propulsion)	19
Ilustración 5: Modelo 1. (Fuente: elaboración propia)	20
Ilustración 6: Simulación de la posición aproximada del navegante en la embarcación. (Fuente: elaboración propia)	22
Ilustración 7: Esquema motor DC con escobillas. (Aprendiendo arduino)	27
Ilustración 8: Esquema motor DC sin escobillas (<i>brushless</i>). (Fuente: elaboración propia)	28
Ilustración 9: Esquema motor eléctrico propulsor tipo <i>Rim drive Thruster</i> . (Modelboats.co.uk)	31
Ilustración 10: Render de un motor eléctrico DC Yamaha con rotor bobinado y escobillas. (Yamaha-motor)	33
Ilustración 11: Motor Haswing Outdoor Protruar 1.0 (Haswing Outdoor)	34
Ilustración 12: Esquema conexión voltímetro y amperímetro a motor. (Fuente: elaboración propia)	35
Ilustración 13: Hélices marinas con distinto número de palas. (Nauticajonkepa.wordpress)	36
Ilustración 14: Hélice de paso variable. (Nauticexpo.com)	38
Ilustración 15: Motor gasolina Honda GX 25. (Honda)	43
Ilustración 16: Montaje y elementos utilizados en el ensayo. (Fuente: elaboración propia)	45
Ilustración 17: Cargas alimentadas por el grupo electrógeno. Cada carga consta de 2 lámparas. (Fuente: elaboración propia)	45
Ilustración 18: Esquema eléctrico instalación para los ensayos. (Fuente: elaboración propia)	46
Ilustración 19: Sensor osciloscopio conectado antes del rectificador. fase-fase a la salida del generador. (Fuente: elaboración propia)	46
Ilustración 20: Probeta donde se introduce combustible para alimentación de motor térmico y tubo de ventilación de aire de la alimentación del motor. (Fuente: elaboración propia)	47

Ilustración 21: Representación del fenómeno fotoeléctrico. Al incidir onda electromagnética en material fotoeléctrico los electrones de éste entran en un estado de excitación generando una corriente. (Fuente: elaboración propia)	55
Ilustración 22: Celda solar fotovoltaica flexible. (Dexen.com)	55
Ilustración 23: Celda solar fotovoltaica de material polimérico. (Dexen.com)	56
Ilustración 24: Posible distribución de 36 celdas solares en el prototipo 1. (Fuente: elaboración propia)	57
Ilustración 25: Esquema funcionamiento pila de combustible. (Fuente: elaboración propia)	58
Ilustración 26: Esquema equivalente de una batería. (Fuente: elaboración propia)	63
Ilustración 27: Croquis de la forma de una batería electrolítica. (Fuente: elaboración propia)	65
Ilustración 28: Esquema batería iónica. (Fuente: elaboración propia)	67
Ilustración 29: Curvas de descarga a diferentes corrientes para batería de plomo-ácido de 115Ah 12V. (Autosolar.com)	70
Ilustración 30: Curvas de descarga a diferentes corrientes para batería de litio hierro fosfato de 100 Ah 12V. (All batteries)	71
Ilustración 31: Ciclos de carga para las baterías ritar. (Autosolar, Batería AGM 12V 70Ah RITAR)	81
Ilustración 32: Distribución aprox. de pesos en el plano de crujía del modelo. (Fuente: elaboración propia)	84
Ilustración 33: Coordenadas de centros de gravedad y masas de los pesos del prototipo. (Fuente: elaboración propia)	85
Ilustración 34: Esquema eléctrico del sistema de propulsión del prototipo. (Fuente: elaboración propia)	86

Tabla de ilustraciones Anexos

Ilustración A 2: Dimensiones básicas del modelo utilizado en el proyecto. (Fuente: elaboración propia)	95
Ilustración A 3: Ejes y planos de referencia de las simulaciones en MaxSurf. (Fuente: elaboración propia)	95
Ilustración A 4: Coeficientes hidrostáticos, dimensiones, desplazamientos y otros datos del modelo. (Fuente: elaboración propia)	96
Ilustración A 5: Parámetros del modelo y rangos considerados en los distintos modelos para estimar la resistencia al avance. (Fuente: elaboración propia)	97
Ilustración A 6: Resistencias al avance y potencia necesaria para distintas velocidades del modelo. (Fuente: elaboración propia)	98
Ilustración A 7: Estimación centro de gravedad del modelo mediante software CAD. (Fuente: elaboración propia)	99
Ilustración A 8: Posición de los pesos en el modelo para el estudio de estabilidad longitudinal para el caso 1. (Fuente: elaboración propia)	99
Ilustración A 9: Posición de los pesos en el modelo para el estudio de estabilidad longitudinal para el caso 1. (Fuente: elaboración propia)	100
Ilustración A 10: Resultados del cálculo de la estabilidad longitudinal del prototipo para el caso 1. (Fuente: elaboración propia).....	100
Ilustración A 11: Trimado final obtenido en Maxsurf Stability para el caso 1. (Fuente: elaboración propia)	100
Ilustración A 12: Posición de los pesos en el modelo para el estudio de estabilidad longitudinal para el caso 2. (Fuente: elaboración propia)	101
Ilustración A 13: Resultados del cálculo de la estabilidad longitudinal del prototipo para el caso 2. (Fuente: elaboración propia).....	101
Ilustración A 14: Trimado final obtenido en Maxsurf Stability para el caso 2. (Fuente: elaboración propia)	101
Ilustración A 15: Posición de los pesos en el modelo para el estudio de estabilidad longitudinal para el caso 3. (Fuente: elaboración propia)	102

Ilustración A 16: Posición de los pesos en el modelo para el estudio de estabilidad longitudinal para el caso 3. (Fuente: elaboración propia)	102
Ilustración A 17: Resultados del cálculo de la estabilidad longitudinal del prototipo para el caso 3. (Fuente: elaboración propia).....	102
Ilustración A 18: Trimado final obtenido en Maxsurf Stability para el caso 3. (Fuente: elaboración propia)	103
Ilustración A 19: Croquis de la disposición de los componentes del sistema propulsivo en el casco. Todas las cotas están en mm. (Fuente: elaboración propia)	104
Ilustración A 20: Croquis de la disposición de los componentes del sistema propulsivo en el casco. (Fuente: elaboración propia).....	104
Ilustración A 21: Curvas de descarga para diferentes corrientes de descarga batería Ritar DC12-65 de 70Ah. (Autosolar, Batería AGM 12V 70Ah RITAR).....	107

Índice de tablas

Tabla 1: Características principales de diferentes productos con características semejantes al presente proyecto. (Fuente: elaboración propia).....	19
Tabla 2: Pesos y aporte en porcentaje de cada uno de los elementos que intervienen en el cálculo de pesos de la embarcación. (Fuente: elaboración propia).....	20
Tabla 3: Datos de los motores eléctricos Protruar 1.0 y Osapian 80lb de Haswing Outdoor.(Fuente: elaboración propia).....	34
Tabla 4: Resultados del Ensayo 1. (Fuente: elaboración propia)	48
Tabla 5: Etapas del Ensayo 2. (Fuente: elaboración propia)	49
Tabla 6: Resultados del Ensayo 2 (Fuente: elaboración propia)	51
Tabla 7: Etapas del Ensayo 3. (Fuente: elaboración propia)	51
Tabla 8: Resultados del Ensayo 3. (Fuente: elaboración propia)	52
Tabla 9: Etapas del Ensayo 4. (Fuente: elaboración propia)	52
Tabla 10: Resultados del Ensayo 4. (Fuente: elaboración propia)	53
Tabla 11: BoM del sistema propulsivo del prototipo. (Fuente: elaboración propia).....	83

Índice de tablas Anexos

Tabla A 1: Resultados obtenidos en los ensayos al grupo electrógeno de Oriol Gallemí. (Fuente: Uniersidad Politécnica de Catalunya).....	93
Tabla A 2: Resultados obtenidos en el Ensayo 2. (Fuente: elaboración propia).....	94
Tabla A 3: Resultados obtenidos en el Ensayo 3. (Fuente: elaboración propia).....	94
Tabla A 4: Resultados obtenidos en el Ensayo 4. (Fuente: elaboración propia).....	94
Tabla A 5: Motores fueraborda eléctricos de corriente continua NV Series de Newport Vessels. (Fuente: elaboración propia)	105
Tabla A 6: Motores fueraborda eléctricos de corriente continua Cloud Mountain. (Fuente: elaboración propia)	105
Tabla A 7: Motores fueraborda eléctricos de corriente continua Haswing Outdoor. (Fuente: elaboración propia)	105
Tabla A 8: Motores fueraborda eléctricos de corriente continua Seamax. (Fuente: elaboración propia)	105
Tabla A 9: Baterías y principales características de funcionamiento consideradas en el proyecto. (Fuente: elaboración propia).....	106

CAPÍTULO I. Introducción y objetivos

1. Introducción

En el presente documento se recoge el proceso seguido en el diseño de un prototipo de embarcación monocasco y en particular del sistema propulsivo híbrido, o eléctrico en su defecto.

Esta barca está destinada a navegar en zonas como canales, pantanos, lagos y lugares donde las condiciones del estado de la mar y el viento no sean muy severas. De pequeñas dimensiones, pero tamaño real, que pueda transportar a una persona adulta de hasta 1,90 metros y 80 kg.

Actualmente, parece que todos los vehículos de estas características se basan en las baterías de iones de litio y los motores *brushless* (sin escobillas), ya que ofrecen ciertas ventajas frente a otros tipos de baterías o motores eléctricos.

Sin embargo, algunos autores han encontrado una configuración, acoplando un generador específico de alta potencia con el motor térmico de menor potencia del mercado (con una potencia nominal de 1CV), que podría funcionar como una fuente de alimentación estable que compita con las baterías.

Para dimensionar el sistema de propulsión se generan varios modelos 3D mediante herramientas CAD. Estos modelos 3D del prototipo, permiten conocer el empuje necesario mediante la herramienta de *software MaxSurf Resistance*; para que la embarcación se desplace a una velocidad.

Con esta información, se realiza la selección de los componentes que configuran el sistema de propulsión final. Posteriormente, mediante la herramienta *MaxSurf Stability*, se realiza un pequeño estudio de la estabilidad longitudinal que adopta el modelo según la distribución de los componentes.

Para determinar la viabilidad del grupo electrógeno en este proyecto se realizan varios ensayos para medir las corrientes y tensiones que aporta el grupo. Además, estos experimentos se realizan en etapas, para las cuales se mide el consumo de combustible del motor térmico, permitiendo calcular un pseudo-rendimiento global del grupo electrógeno.

Para finalizar el proyecto, se recogen los componentes del sistema y los costes de los mismos en un listado con la propuesta de la distribución de los componentes, y los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones. Con esta propuesta, se definen los pasos a seguir para poder optimizar el diseño del sistema propulsivo y de la embarcación en sí.

2. Objetivos

El objetivo principal del proyecto es conseguir la propuesta de un sistema de propulsión híbrido o eléctrico que permita una autonomía mínima de una hora y media a una velocidad de al menos tres nudos y medio. De esto, se derivan una serie de premisas a cumplir:

- Una selección de los componentes que constituyan el sistema de propulsión, conociendo las posibilidades del proyecto y la aplicación que se requiere. Que sea un sistema de propulsión que permita un régimen de trabajo de no mucha potencia y bastante autonomía.
- Conocer el alcance de los distintos dispositivos que se estudien en el desarrollo del proyecto.
- Caracterizar un grupo electrógeno y definir la viabilidad del equipo en este proyecto.
- Definir la distribución más funcional de los diferentes componentes seleccionados mediante un estudio básico de las formas de la embarcación y la distribución de los diferentes componentes que complementen el diseño del sistema de propulsión.
- Definir las medidas que se pueden adoptar para obtener información que ayude a mejorar el modelo.
- Obtener un coste aproximado de construcción del prototipo.
- Definir las líneas de desarrollo que debería seguir el proyecto.

CAPÍTULO II. La embarcación. Dimensiones, características y necesidades propulsivas.

En este primer capítulo se define el tipo de embarcación en la que se instalaría el sistema propulsivo propuesto en este proyecto.

Se definen las dimensiones y formas de un modelo CAD que complemente la elección de los componentes y características del sistema propulsivo, en base a modelos existentes en el mercado.

1. Modelos que han inspirado el proyecto

1.1 Mini Boat RapidWhale

El proyecto está basado en un producto denominado *Mini Boat* de la compañía *Rapid Whale* construido y diseñado por *Josh Tulberg* de Estados Unidos.

Esta mini barca eléctrica, pero tamaño real tiene 1,80 metros de eslora, una manga de 0,80 metros y un puntal de 0,60 metros y está diseñada para poder transportar una persona adulta de hasta 1,90 metros y 90 kg. (RapidWhale, Josh Tulberg)



Ilustración 1: mini barca eléctrica Miniboat RapidWhale. (RapidWhale, Josh Tulberg)

En resumen, la siguiente tabla recoge las principales características más significativas de este producto.

1.2 SEABOB F5

Otro instrumento que ha salido al mercado recientemente es el modelo F5 de la marca *Seabob Adventure*. Este es una especie de transbordador, tal y como se muestra en la siguiente imagen, capaz de navegar por encima del agua o sumergido.



Ilustración 2: SEABOB F5. (SEABOB Adventure)

Puede navegar a una velocidad de unos 9 nudos por encima del agua y de 6 por debajo. Para impulsarse hace uso de un sistema patentado por la marca conocido como *E-Jet Power System*, que funciona según el principio de desplazamiento del agua. Un impulsor rotatorio aspira el agua y la expulsa a alta presión por el tubo Jet impulsando a la embarcación con una fuerza de 480 N. (SEABOB Adventure)

1.3 LiftFoil

Otro producto semejante en el mercado son los nuevos *e-Liftfoils* que acomodan el mismo nombre de la marca. Se trata de una tabla hecha de fibra de carbono con una forma similar a las utilizadas en deportes acuáticos, a la cual se le instala un perfil hidrodinámico (*foil*) que acopla un motor con un diseño de torpedo. Pueden alcanzar velocidades de hasta 25 nudos. (LiftFoil)



Ilustración 3: LiftFoil e-Foil. (LiftFoil)

Estos instrumentos disponen de la hélice de tres palas dentro de una tobera, lo que atenúa el fenómeno de la cavitación; además de mejorar el rendimiento general del propulsor. (Heras Zurita, 2013)

1.4 Yamaha SeaScooter 500 Li

Por último podemos encontrar este impulsor submarino de la marca Yamaha.



Ilustración 4: Yamaha SeaScooter 500 Li. (My SeaScooter Underwater Propulsion)

Finalmente, en este cuadro se resumen las principales características de cada uno de los productos. El tipo de motor y tecnología que utilizan, la fuente de alimentación en forma de batería, pesos y precios de los mismos.

	Tipo motor	Fuente Alimentación	Potencia (W)	Velocidad (kn)	Autonomía (min)	Peso (kg)	Precio (€)
RapidWhale	DC Imanes permanentes	Baterías plomo-ácido	315	3,5	120	61	2.000
Seabob F5	sistema jet	baterías Litio manganeso	2500	9	30	29	8.000
e-LiftFoil	Brushless DC	Baterías Litio-ion		25	60		11.000
SeaScooter 500 Li		Baterías Litio-ion	260	4	90	9,5	1.500

Tabla 1: Características principales de diferentes productos con características semejantes al presente proyecto.

(Fuente: elaboración propia)

La principal diferencia de los precios entre los tres modelos radica en los materiales de construcción, así como los componentes de los que disponen en cuanto a baterías, motores y electrónica.

2. Datos generales de la embarcación

2.1 Características del proyecto

Se pretende que el prototipo consiga navegar a unos 3,5 nudos de velocidad o más. Con una autonomía de al menos 1h 30min; que se pueda extender mediante sistemas de generación de energía o disponiendo de baterías de respaldo en la embarcación que permitan el cambio de batería alargando la autonomía.

La embarcación tendrá un desplazamiento máximo de 170 kg; considerando que el peso del casco será de unos 30 kg, los componentes del sistema de propulsión y gobierno 40 ó 50 kg y el tripulante entre 70 y 90 kg como máximo.

	Peso (kg)	Porcentaje de peso
Casco	30	21,43%
Sistema propulsión	40 - 50	28,57 - 29,41 %
Tripulante	70 - 90	0,5 - 0,53%
Desplazamiento	140 - 170	100%

Tabla 2: Pesos y aporte en porcentaje de cada uno de los elementos que intervienen en el cálculo de pesos de la embarcación. (Fuente: elaboración propia)

2.2 Modelos utilizados en el proceso de estudio del proyecto

Inicialmente se construyen dos modelos CAD para simular el comportamiento y las necesidades propulsivas del tipo de embarcación a la cual se destina el sistema de propulsivo.

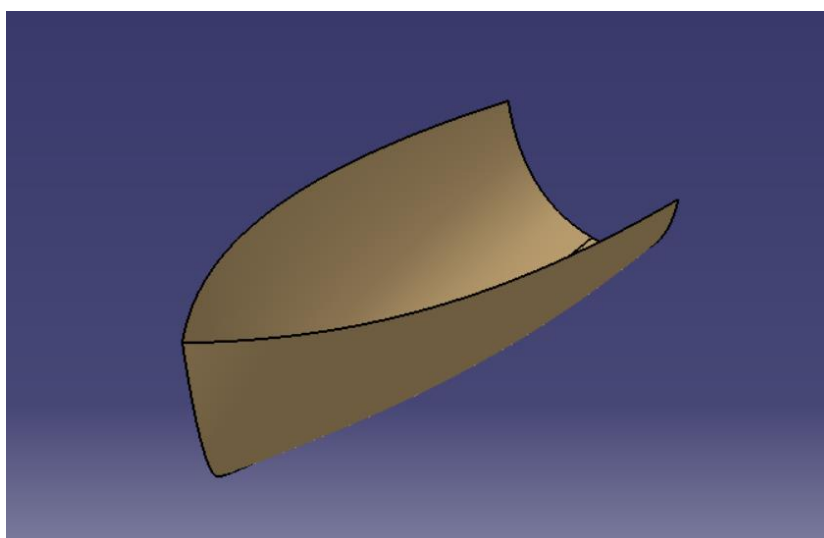


Ilustración 5: Modelo 1. (Fuente: elaboración propia)

Los modelos tendrán unas dimensiones básicas de:

- 1,8 metros de eslora
- 0,85 metros de manga
- 0,60 metros de puntal
- Un desplazamiento aproximado de 170 kg, con un calado de 0,25 metros.

Se han construido dos modelos con unas geometrías de formas muy distintas, una de estas formas recuerda a la embarcación de *Josh Tulberg*; con el fin de poder realizar distribuciones de los componentes que formen el sistema propulsivo. En base a estas distribuciones se realizará un pequeño estudio de la estabilidad longitudinal del prototipo.

El primero de los modelos, se construyó a partir de una geometría existente en las librerías del software de diseño MaxSurf Modeler, el simple yacht. Al casco, que viene definido inicialmente, se le modifica las dimensiones y la geometría para obtener la forma deseada.

El prototipo 1 será el casco que se utilizará posteriormente para probar las distintas distribuciones posibles de los componentes del sistema, así como del navegante y con el que se realizarán los estudios de estabilidad longitudinal del prototipo final.

El segundo modelo, se genera su geometría desde cero mediante CATIA V5, un software paramétrico de diseño CAD. Se genera una geometría muy parecida al modelo de *Josh Tulberg*.

2.3 El maniquí

Con el fin de simular el posicionamiento del tripulante en la embarcación se ha hecho uso del software CATIA V5 y gracias a uno de sus módulos de ergonomía se ha insertado un maniquí en el Prototipo 1, permitiendo estudiar la distribución de los espacios en el modelo.

Dicho estudio se ha realizado con un maniquí de 1,80 metros de alto y unos 80 kg de peso. Se ha colocado con diferentes posturas, pudiendo determinar el espacio que ocuparía y la disposición que puede adoptar el sistema propulsivo del prototipo.

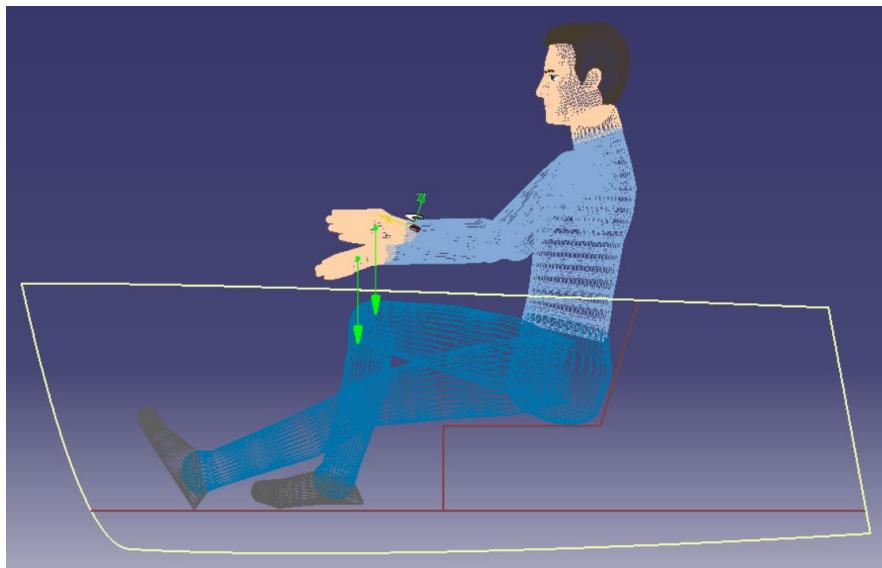


Ilustración 6: Simulación de la posición aproximada del navegante en la embarcación. (Fuente: elaboración propia)

Posteriormente, en los estudios de estabilidad, se trabajará con diferentes pesos de personas, pudiendo ver como se ve afectada la estabilidad longitudinal del modelo.

3. Estimación de las necesidades propulsivas de la embarcación

En el caso particular de este proyecto, el mercado actual se basa en vehículos que utilizan baterías de ion-litio y motores DC *brushless*.

Los motores eléctricos presentan una serie de ventajas respecto a los motores térmicos que los hace ideales para la aplicación a la que se destinan en este proyecto.

3.1 Simulación MaxSurf Resistance

Primeramente se realizan una serie de simulaciones mediante el software MaxSurf Resistance, a partir de las cuales se conocen las necesidades propulsivas de cada embarcación.

Para el Prototipo 1 se realiza una simulación mediante todos los métodos disponibles en MaxSurf para estimar la potencia requerida y la resistencia al avance del modelo. Esta simulación se realiza para velocidades des de los 0 nudos hasta los 5 nudos, con un calado de 0,25 metros que le da a la embarcación sus 170 kg de desplazamiento.

En los resultados obtenidos, los distintos métodos varían en un amplio rango. Para una velocidad de 5 nudos la resistencia al avance resulta entre los 150 y los 300 N, a excepción del método de Wyman que destaca por aproximar este resultado a los 1.000 N. La potencia requerida a esa velocidad es de entre 300 y 700 Watts, mientras que el método de Wyman da un resultado superior a los 2.600 W.

Para la velocidad de 3,5 nudos, velocidad a la que trabaja el *MiniBoat* de *RapidWhale*, la resistencia al avance ronda los 100 ó 150 Newtons máximo, exceptuando el método de Wyman que lo establece en 500 N. Las potencias varían entre los 100 y 300 Watts y se acerca a los 1.000 W de potencia según Wyman.

Todos los resultados obtenidos en las simulaciones se recogen en detalle en el Anexo 1 apartado A.1.

3.2 Primer dimensionado del sistema de propulsión

Josh Tulberg, creador del *Mini Boat*, dice que con el motor *Newport Vessels NV series trolling motors* de 46 lb (unos 200 N) de empuje consigue una velocidad de 3,5 nudos para su embarcación. Considerando los pesos de su barca podemos conocer el desplazamiento aproximado que tendrá. (RapidWhale, Josh Tulberg)

$$\text{Peso Casco } 30 \text{ kg} + \text{Baterías } 21 \text{ kg} + \text{motor } 10 \text{ kg} + \text{persona } 90 \text{ kg} = 151 \text{ kg}$$

Este podría ser el desplazamiento aproximado de la embarcación.

Se desconoce si en el peso del casco Josh cuenta con los diferentes instrumentos que ha instalado para el gobierno de la quilla del motor, el asiento y otros componentes auxiliares que puedan incrementar ese peso en un rango de 10 a 20 kg.

Si consideramos la semejanza en las características de los prototipos 1 y 2 al *Mini Boat* de *RapidWhale*, en cuanto a dimensiones y desplazamiento; considerando el empuje que necesita la embarcación de Josh (unos 200 N) y sobredimensionando un poco el sistema, para evitar que luego en la práctica el propulsor no ofrezca el empuje esperado, se puede considerar un sistema de propulsión que aporte aproximadamente 250 N de empuje. Con este empuje debería ser suficiente para desplazar la embarcación a una velocidad de más de 3,5 nudos.

Para generar las 46 libras de empuje que da (unos 200 N), el motor eléctrico que utiliza el *Mini Boat* consume 26 A a máxima velocidad, con un voltaje de 12 V, consecuentemente la potencia que consume el motor es,

$$26A \cdot 12V = 312 W,$$

Dispone de 2 baterías de ácido-plomo AGM de 12 V y 35 Ah, de ciclo profundo, lo que significa que tiene una capacidad total de,

$$35Ah \cdot 12V = 420 Wh,$$

Finalmente, a partir de la capacidad de la batería y la potencia consumida por el motor podemos calcular la autonomía de la embarcación, según las especificaciones de los componentes que monta la embarcación,

$$\frac{420 Wh}{312 W} = 1,33 \text{ horas}$$

Es decir la embarcación puede navegar durante 1,33 horas para cada descarga de una de las baterías. Al disponer de 2 baterías, se puede desconectar una y conectar la que esté cargada, permitiendo otras 1,33 horas de navegación, según afirma *Josh*. (RapidWhale, Josh Tulberg)

4. Resumen del contenido del Capítulo II

En este punto se tiene una primera definición del proyecto a realizar.

- Se pretende dimensionar un sistema de propulsión capaz de impulsar la embarcación a:
 - Velocidad de 3,5 nudos o más.
 - Autonomía de mínimo 1h 30min.
- Dimensiones de la embarcación:
 - 1,80 metros de eslora.
 - 0,80 metros de manga.
 - 0,60 metros de puntal.
 - 170 kg máximo de desplazamiento.
- El empuje necesario para que la embarcación navegue a esa velocidad, según simulaciones, es de al menos 250 N.
- Para la distribución de espacios y los ensamblajes realizados se utiliza un maniquí que simula una persona adulta de 1,80 metros de altura y entre 70 y 90 kg de peso.

CAPÍTULO III. Propulsión. Máquinas eléctricas y hélices

Los motores eléctricos son dispositivos capaces de convertir energía eléctrica en energía mecánica. Algunas máquinas eléctricas pueden ser reversibles, lo que las convierte en generadores, y que les permite aprovechar un movimiento mecánico para generar electricidad, permitiendo por ejemplo, recargar un acumulador eléctrico o alimentar una carga. Son máquinas eléctricas rotatorias compuestas por un estator y un rotor.

Los motores eléctricos presentan algunas ventajas frente a los motores de combustión interna. Por una parte, para una misma potencia un motor de combustión tiende a ser un poco más grande y pesado que uno eléctrico. Por otra parte, el movimiento alterno de los motores de combustión propicia el desgaste de las piezas del mismo, genera ruidos y vibraciones, a diferencia de los motores eléctricos que son máquinas rotatorias como se ha comentado.

Además, otra gran ventaja de los motores eléctricos es la facilidad para la inversión en el sentido de giro del eje del motor. Mientras que en un motor eléctrico, este cambio en el sentido de giro del motor se realiza invirtiendo las fases de conexión del motor, un motor térmico debe frenarse completamente para poder empezar a girar el eje en el sentido opuesto. Esto también se traduce en una mejor maniobrabilidad de la embarcación que disponga de dicho sistema de propulsión.

En cuanto al rendimiento, los motores de combustión interna suelen alcanzar rendimientos cercanos al 30 ó 40 %, mientras que los motores eléctricos alcanzan rendimientos entre el 70 y 98%. Hay que destacar que estos rendimientos no pueden compararse sin más. En el caso del motor térmico hay una serie de procesos mediante los cuales se aprovecha la energía del combustible para transformarla en energía mecánica. El motor eléctrico hace una conversión de energía directamente, de eléctrica a mecánica. Esta transformación de la energía se realiza de manera más eficiente en los motores eléctricos y así podemos afirmar que un motor eléctrico tendrá un mayor rendimiento que uno térmico, aun conociendo sus diferencias.

Estas son las principales ventajas que empujan a utilizar un motor eléctrico como medio de propulsión en este proyecto.

1. Máquina de corriente continua

Las máquinas de corriente continua (DC, del inglés *direct current*) son máquinas eléctricas que se alimentan mediante corriente continua, tal y como su nombre indica. Presentan un estator (inductor o excitación de la máquina) donde se encuentran las bobinas o imanes permanentes de la máquina, y un rotor, llamado generalmente inducido, que consta de unas espiras unidas a un núcleo de hierro, solidario al eje de la máquina.

Estos componentes pueden considerarse como dos electroimanes, que por definición es un instrumento conductor de energía eléctrica capaz de generar un campo magnético al hacer circular una corriente por el material conductor. La interacción entre el campo magnético del estator y el del rotor, respectivamente, generan un par motriz que impulsa el rotor a una velocidad angular. El principio de funcionamiento es parecido para todas las tipologías de motores de continua más establecidos en el mercado.

1.1 Motor de corriente continua con escobillas

El estator de la máquina crea un campo magnético fijo al alimentar las bobinas que lo componen, con una tensión continua y una corriente, o mediante imanes permanentes.

Por otra parte, se hace circular por el rotor una intensidad que crea un campo solidario al mismo. Esto se realiza mediante unas escobillas que entran en contacto alternamente a cada extremo de las espiras.

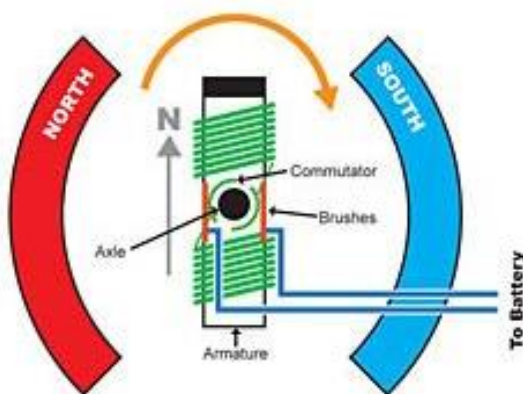


Ilustración 7: Esquema motor DC con escobillas. (Aprendiendo arduino)

1.2 Motor de corriente continua sin escobillas (*Brushless*)

Las escobillas del motor de DC son piezas que sufren mucho desgaste debido a que se encuentran en permanente contacto, causando rozamiento y aumentando los costes de mantenimiento y de reparación de este tipo de motores eléctricos. El motor DC sin escobillas pretende solucionar este problema, eliminando las escobillas.

Esta máquina está construida de manera que se invierte la posición del imán permanente, que pasa a ser el rotor, e incorpora las espiras en el estator, eliminando la necesidad de las escobillas y el rozamiento entre las piezas.

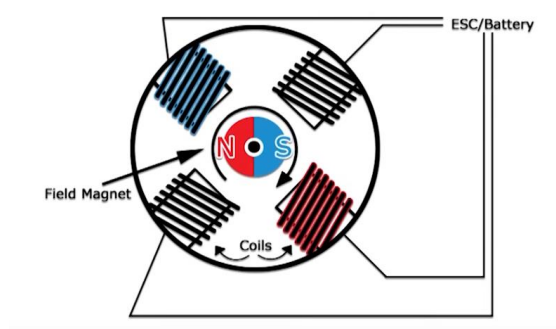


Ilustración 8: Esquema motor DC sin escobillas (*brushless*). (Fuente: elaboración propia)

Actualmente existe la posibilidad incluso de construir un motor con esta tecnología, capaz de producir unos 600 W, en tu propia casa. *Christoph Laimer* es el diseñador de un motor DC de imanes permanentes y rotor bobinado sin escobillas cuyos componentes principales se pueden imprimir con impresora 3D; las bobinas, imanes y anillos o rodamientos son componentes que deben comprarse en el mercado. Dice que el coste aproximado de los materiales, junto con los ficheros de diseño de los componentes es de un total de 70 €. (Laimer)

1.3 Ventajas y desventajas de los motores de corriente continua

En primera instancia, los vehículos presentados en el segundo capítulo de este trabajo funcionan con motores de corriente continua, debido a que la potencia necesaria no es muy grande y por simplificar los sistemas. El hecho de ser alimentados con corriente continua hace que no sea necesario transformar la corriente proveniente de una fuente de energía como pudiera ser una batería o placas solares. Las baterías suministran corriente continua, a 12 V, 24 V o la tensión que se requiera para la aplicación. Así, un motor DC puede ser alimentado directamente por la batería, sin necesidad de instalar un inversor DC/AC.

Los vehículos con un mayor coste como los liftfoils utilizan motores brushless, a diferencia de la embarcación de Josh Tulberg que utiliza un motor de imanes permanentes y de rotor bobinado con escobillas, que también es mucho más barato. La construcción de los motores *brushless* es más simple ya que suelen estar contruidos con un rotor de imanes permanentes, que a su vez los hace tener una construcción más robusta que la de un motor con escobillas, ya sea de corriente continua o alterna, además de que precisa un menor mantenimiento y una consecuente vida útil más larga.

La flexibilidad que se puede obtener de los motores de corriente continua, asociada a la facilidad en la obtención de corriente continua, determina una ventaja de estos sobre los motores de inducción (o corriente alterna). Esto simplifica los dispositivos a incorporar en el sistema de propulsión.

Sin embargo, para una misma potencia los motores de corriente continua son mayores y más caros que los motores de inducción. Sin embargo, al tener una construcción más simple son más robustos y acostumbran a necesitar menos mantenimiento, aunque actualmente los motores de inducción tampoco tienen grandes requerimientos de mantenimiento.

Debe controlarse el arranque de los motores de corriente continua, ya que la intensidad de arranque sólo viene limitada por la resistencia de los devanados la cual es muy pequeña.

2. Máquina de corriente alterna

Tal y como indica su nombre, este tipo de motores requieren una conexión a una fuente de energía que les proporcione una corriente alterna. Aquellos motores de AC (del inglés *altern current*) que se conecten a una fuente de alimentación de DC requieren de un instrumento capaz de realizar la conversión entre los dos tipos de corriente, conocidos como inversores.

Por lo general, cuando hablamos de alternadores hacemos referencia a máquinas de corriente alterna que generan corriente a partir de un movimiento. La facilidad en la conversión de un motor de alterna a generador, es una de las principales ventajas de este tipo de máquinas.

En esta línea, los generadores eléctricos acostumbran a ser de corriente alterna, necesitando de un rectificador AC/DC para modificar esa corriente y poder alimentar, por ejemplo, un motor de DC.

Existen dos familias de motores de corriente alterna: los síncronos y los asíncronos. Su diferencia radica en el sincronismo que se establece, o no, entre la velocidad angular de los campos magnéticos del rotor y estator y el propio rotor.

2.1 Motor síncrono de reluctancia conmutada o variable

En este tipo de motores la corriente es conmutada entre las bobinas de cada fase del estator hasta crear un campo magnético que gira. El rotor está constituido por un material magnético con polos salientes. La interacción entre ambos campos magnéticos genera, como en el caso de la máquina síncrona de imanes permanentes, un par que mantiene al rotor girando a una velocidad de sincronismo. Este tipo de motores no necesitan escobillas.

2.2 Motor síncrono de imanes permanentes

Las máquinas síncronas de imanes permanentes reciben ese nombre por que presentan rotor, con un imán permanente; y un estator con tres devanados distintos, correspondientes a las tres fases de un sistema trifásico y desfasadas 120º entre sí. Al circular la corriente trifásica por estas bobinas, se genera el campo magnético en el rotor, cuando cada fase correspondiente pasa por cada una de las bobinas.

2.2.1 Rim drive thruster

En el SMM 2012 International Trade Fair en Hamburgo, la compañía holandesa *Van der Velden Marine Systems* presentaba su innovador sistema de propulsión basado en un propulsor con tobera. En esta tobera va instalada el motor síncrono de imanes permanentes. La parte externa corresponde con el estator de la máquina y el rotor es un anillo rodante dentro de la tobera. En este anillo van instalados las palas del propulsor. Esta tecnología elimina por completo los ejes y líneas de transmisión entre motor y hélice. Además, según dice la marca, el empuje conseguido por la hélice es igual cuando el flujo de agua entra en una dirección u otra. (DAMEN MARINE COMPONENTS)

Actualmente la compañía *Voith* también empieza a construir propulsores de este tipo y aunque por ahora las aplicaciones de esta tecnología son para potencias muy superiores a las consideradas en este proyecto, sin duda es una tecnología muy novedosa y que seguro presenta muchas ventajas frente a los sistemas convencionales de propulsión en los que la hélice se acopla al eje del motor, que es solidario al propio rotor. (Voith)

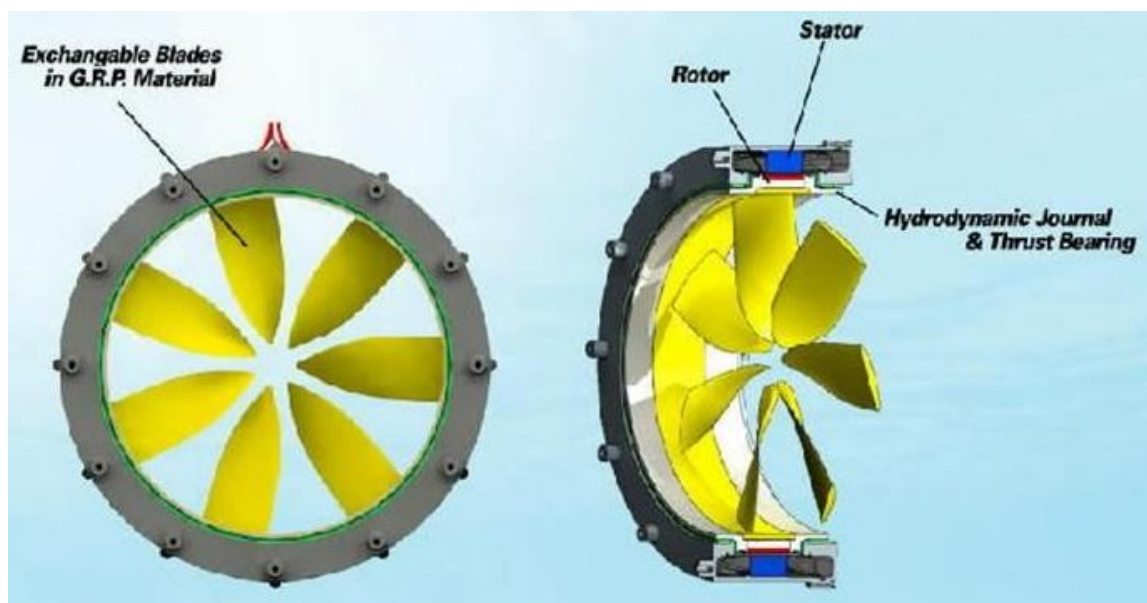


Ilustración 9: Esquema motor eléctrico propulsor tipo *Rim drive Thruster*. (Modelboats.co.uk)

2.3 Motor asíncrono

El principio de funcionamiento de los motores asíncronos es el mismo que el de las máquinas síncronas: la creación de un campo magnético giratorio creado por los devanados estatóricos cuando son alimentados con unas tensiones trifásicas simétricas y equilibradas.

Las máquinas asíncronas trifásicas presentan el estator como el de las máquinas síncronas. Una serie de conductores formando tres devanados, uno para cada fase de la corriente de alimentación.

Existen distintos tipos de rotor, constructivamente se puede distinguir entre,

- Rotor bobinado. En este tipo de rotor se alojan devanados que se caracterizan por ser espiras con conductores de sección pequeña. El devanado acostumbra a ser de tres fases conectadas generalmente en estrella. El rotor se alimenta a través de unas escobillas.
- Rotor de jaula de ardilla. En el exterior del cilindro de chapa, paralelos al eje se colocan los conductores, formados por una serie de barras de cobre o aluminio las cuales están cortocircuitadas en ambos extremos por unos anillos del mismo material.

2.4 Ventajas y desventajas de los motores de corriente alterna

Este tipo de motores tiene un coste de producción menor que los de corriente continua, en general.

La regulación de la velocidad se realiza mediante electrónica ya que esta depende únicamente de la frecuencia y el número de pares de polos que presenta la máquina. En los motores de corriente continua, en cambio, la velocidad se regula mediante la tensión de alimentación.

La corriente de arranque no es tan elevada, por lo que no se debe tener tanta precaución con ésta como con los motores de continua. Sin embargo el par de arranque también es menor.

3. Selección del motor

Como se ha establecido en el Capítulo I se requiere un empuje aproximado de 250N para conseguir una velocidad de más de 3,5 nudos.

La opción más barata y simple para este prototipado, es la de un motor eléctrico fueraborda. Este tipo de motores, al trabajar en un medio acuático, ya son mejor refrigerados puesto que están en contacto casi directo. Acostumbran a ser de corriente continua y hay disponibles tanto modelos de motores brushless como con escobillas y rotor bobinado.

Disponen, en un extremo de la caña, de un mango que incorpora un marcador led que suele indicar el estado de la batería que se le conecta y otro marcador led para las velocidades del mismo motor. Esta caña vertical suele ser de aluminio, fibra de vidrio u otros materiales compuestos y permite rotar el motor 360°.

El motor se encuentra alojado en una carcasa normalmente de acero inoxidable, que es solidaria a la caña, con una forma que recuerda a un torpedo y una hélice acoplada al eje impulsor, que acostumbra a ser de dos o tres palas dependiendo del empuje que suministra el motor.



Ilustración 10: Render de un motor eléctrico DC Yamaha con rotor bobinado y escobillas. (Yamaha-motor)

La selección del motor se ha centrado en una de las marcas que ofrecía una mayor gama de potencias de motores y de la que se ha podido conseguir más información. De los 5 modelos recogidos de la marca *Haswing Outdoor*, los *Osapian*, tanto el modelo de 55 lb como el de 80 lb, utilizan tecnología de rotor bobinado y escobillas. Los 3 modelos *Protruar* montan un motor *brushless*.

Dado el empuje que se requiere para mover la embarcación se decide optar por dos modelos: el Osapian 80 lb o el Protruar 1.0. Ambos motores son capaces de suministrar el empuje necesario para que la embarcación se desplace a 3,5 nudos de velocidad o más. La marca recomienda utilizar baterías de 12V y 105Ah de ciclo profundo con tecnología AGM (del inglés, *absorbent glass mat*). (Haswing Outdoor)



Ilustración 11: Motor Haswing Outdoor Protruar 1.0 (Haswing Outdoor)

A continuación se muestra una tabla de las principales características de estos motores:

Haswing outdoor	Tecnología	P consum (W)	Empuje (N)	Voltage (V)	Corriente (A)	Peso (kg)	Precio (€)
Osapian 80 lb	Escobillas y rotor bobinado	840	355,8	24	35	12,8	250
Protruar 1.0	Brushless e imanes permanentes	600	289,1	12	50	8,2	350

Tabla 3: Datos de los motores eléctricos Protruar 1.0 y Osapian 80lb de Haswing Outdoor. (Fuente: elaboración propia)

El modelo Protruar 1.0 tiene un pico de intensidad máxima de 50A, que probablemente sean por el arranque del motor. La intensidad nominal del motor es de 1,5 a 3 veces menor que la de arranque.

$$I_N = \frac{I_{arr}}{1,5} = 33,3 A$$

Dividiendo la corriente de arranque entre 1,5 consideramos que la corriente nominal es la más grande posible, sobredimensionando en parte el sistema. Se consideran 35 A de corriente a una tensión de 12 V.

Josh Tulberg afirma que el motor *NV Series 46 lb* de *Newport Vessels* trabaja a 26 A. Mirando las especificaciones del motor, queda indicado que el pico de corriente es de 40 A.

$$\frac{I_{arr \text{ NV Series 46lb}}}{I_N \text{ NV Series 46lb}} = \frac{40}{26} = 1,54$$

Que es la relación utilizada para obtener una estimación del consumo del motor.

Realizando este mismo cálculo para el modelo *Osapien 86 lb*, del cual tenemos una corriente máxima de 35A según las especificaciones, tenemos:

$$I_N = \frac{I_{arr}}{1,5} = 23,3 \text{ A}$$

En este caso la alimentación del motor se considerará de 25A a 24V de tensión.

Un objetivo secundario de este proyecto es conseguir un prototipo que pueda arrojar más información sobre los consumos del motor usado y optimizar en general el sistema eléctrico a bordo.

Para realizar estas mediciones se decide instalar un amperímetro y un voltímetro que puedan medir los consumos a las diferentes velocidades que tiene el motor, tal y como se muestra en el siguiente esquema.

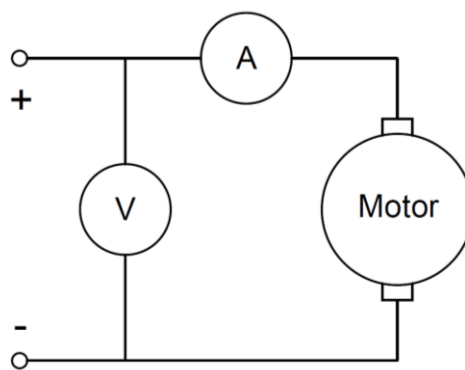


Ilustración 12: Esquema conexión voltímetro y amperímetro a motor. (Fuente: elaboración propia)

Con esta simple inversión puede conocerse tanto el consumo instantáneo del motor como consumos medios, para cada una de las velocidades.

4. Hélices

En este capítulo se pretende recoger la información sobre las características típicas de las hélices, los tipos de hélices que existen e información redundante para el proyecto en general.

Características de las hélices

- Paso: avance cuando da una vuelta completa.
- Retroceso: diferencia entre el avance hipotético y el avance real.
- Diámetro: circunferencia circunscrita a los extremos de las palas.
- Sentido de giro: dextrógiras (paso a la derecha mirando desde proa) o levógiras (paso a la izquierda).

(Heras Zurita, 2013)

4.1 Tipos de hélices según el número de palas

Una hélice de una pala sería lo más deseable si ésta pudiera tolerar la vibración. De esta forma, para obtener un nivel aceptable de equilibrio con mucha menos vibración, lo mejor es utilizar una hélice de dos palas. Al añadirse palas, el rendimiento disminuye, pero también el nivel de vibraciones. La mayoría de hélices están compuestas por tres palas formando un compromiso entre vibración, tamaño adecuado, rendimiento y coste. La diferencia de rendimiento entre una hélice de dos o tres palas se considera menos significativa que la diferencia de vibraciones.

(Heras Zurita, 2013)



Ilustración 13: Hélices marinas con distinto número de palas. (Nauticajonkepa.wordpress)

Al realizar la búsqueda de posibles motores para la embarcación se ha observado como los modelos con un empuje menor, utilizaban hélices de dos palas; por otra parte aquellos motores con mayor potencia utilizaban hélices de 3 palas.

Esto es razonable según los argumentos de Rubén ya que al utilizar un motor con mayor potencia, entendemos que los niveles de vibraciones pueden aumentar. Al instalar en este motor una hélice de tres palas en vez de la de dos, disminuyen las vibraciones generadas, aunque el rendimiento disminuye, pero en menor grado.

Dado que la mayoría de estos motores están destinados a barcas, canoas, kayaks y otros tipos de embarcaciones en muchos casos para la práctica de pesca deportiva, interesa generar cuanto menos ruido posible mejor, para no ahuyentar a los peces.

4.2 Tipos de hélices según su forma y material de construcción

Se pueden distinguir dos tipos de hélices en función de su construcción: modulares y moldeadas. Los materiales utilizados en las hélices pueden ser acero inoxidable, bronce, aluminio, acero al carbono, carbono, materiales compuestos y plásticos.

4.2.1 Modulares

Hélices utilizadas en barcos de gran porte. Su construcción se basa en el ensamblado de grandes piezas de material, normalmente acero, y que en conjunto forman la propela totalmente armada. (Heras Zurita, 2013)

4.2.2 Moldeadas

Hélices utilizadas en barcos de eslora máxima no superior a 200 pies (60 metros aproximadamente). Son de una sola pieza de fundición montada sobre un mango elástico sobre el eje de la misma. Por norma general es de goma o de material similar y sirve para amortiguar los golpes que pueda recibir la hélice estando en funcionamiento. (Heras Zurita, 2013)

Aunque no son construidas mediante moldes, en este subgrupo se pueden incluir aquellas hélices construidas mediante impresoras 3D. Los materiales más utilizados con esta tecnología son plásticos y/o poliméricos tipo PLA con refuerzos de kevlar o nylon; o plásticos con aleaciones metálicas en su composición. Estas alternativas ofrecen ventajas como un menor peso, gran resistencia y un menor coste de producción.

4.3 Tipos de hélice según el sistema de propulsión

4.3.1 Hélices de paso fijo

Este tipo de hélices es la más común debido a su relativo bajo precio. También se conocen como de “paso constante”; lo que significa que el paso en toda la superficie del aspa, exceptuando sus ángulos, no cambia. (Heras Zurita, 2013)

4.3.2 Hélices de paso controlable

Este tipo de hélices se aprovecha de una tecnología que, mediante servomotores y mecanismos hidráulicos, permite variar la orientación de las palas de la hélice a voluntad, permitiendo variar el paso de la misma. Este tipo de sistema se utiliza en embarcaciones donde se requieran sistemas muy eficientes como mercantes, embarcaciones de alta velocidad, etc.

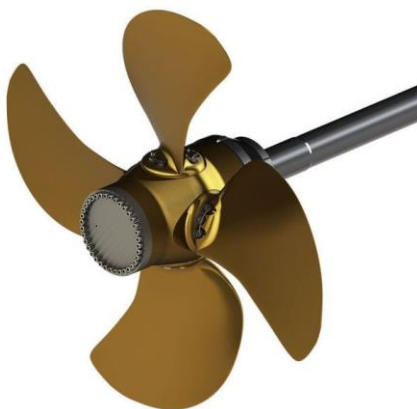


Ilustración 14: Hélice de paso variable. (Nauticexpo.com)

4.4 Sistemas de tobera

Las hélices en toberas están ensambladas dentro de un perfil hidrodinámico cuya principal ventaja es un incremento del empuje cercano al 40%. Existen toberas diseñadas para obtener el mejor empuje hacia delante, y otras para ambas direcciones.

Por lo general, los expertos afirman que esta tecnología es óptima para aplicaciones de baja velocidad, que no superen los 14 nudos.

El flujo de agua se acelera en el disco de la hélice debido a la presencia de la tobera. Esto permite aumentar el coeficiente de estela y el rendimiento de la hélice. Éste rendimiento es notable cuando el resbalamiento de la hélice es importante, como ocurre en los remolcadores. Existen sistemas que permiten que se pueda girar la tobera alrededor de un eje vertical. De esta manera el propulsor se puede hacer utilizar como timón. (Heras Zurita, 2013)

5. Resumen del contenido del Capítulo III

- Se seleccionan dos posibles motores:
 - Protruar 1.0. Motor *brushless* con un peso de 8,2kg y un coste de 350€. Proporciona 290N de empuje.
 - Osapian 80lb. Motor con escobillas, con un peso de 12,8kg y un coste de 250€. Proporciona 350N de empuje.
- Los consumos de los motores son, respectivamente:
 - 50A de corriente máxima a 12V, se estima un consumo nominal de 35A.
 - 35A de corriente máxima a 24V, se estima un consumo nominal de 25A.
- La marca recomienda utilizar baterías de plomo ácido de 105 Ah y ciclo profundo para sus motores.
- Se instalará un amperímetro y un voltímetro que permita obtener información del consumo del motor, para dimensionar correctamente toda la instalación eléctrica.

6. Futuras líneas de estudio y desarrollo

Poder monitorizar los consumos de corriente y tensión del motor en funcionamiento, para determinadas velocidades, permite hacer una selección más óptima de los tipos y características de los dispositivos que suministren la energía necesaria al motor. También puede diseñarse una electrónica que controle la velocidad a conveniencia, según las posibilidades del motor.

Para un primer prototipado, que el motor ya venga con una hélice diseñada “a medida” satisface los requisitos. Sin embargo, una opción interesante es la de desarrollar una hélice en base a las características de funcionamiento del motor (rpm, torque, etc.) y una tobera que se pueda acoplar a la carcasa del motor, con un perfil hidrodinámico que junto con el propulsor permitan mejorar el rendimiento general de la instalación, aumentando el empuje que aporta el motor. El diseño podría crearse mediante impresoras 3D y haciendo un recubrimiento de fibra de carbono o algún otro material que aporte más resistencia a la hélice mediante moldeo.

La elección de una hélice y un motor está directamente relacionado por diversos aspectos, resultando una carga extensa de trabajo. Sin duda esta es una de las líneas de desarrollo a seguir para optimizar el conjunto motor-hélice.

CAPÍTULO IV. Sistemas para la generación de energía eléctrica

En este capítulo se recoge la información del grupo electrógeno que alimenta al motor eléctrico de la embarcación y en particular, los ensayos realizados para caracterizar correctamente al grupo y conocer la viabilidad para instalar el mismo.

Por otra parte, a modo de investigación, se ha estudiado la posibilidad de instalar placas solares u otros dispositivos capaces de realizar un aporte energético extra al sistema propulsivo.

1. Grupo electrógeno

Los grupos electrógenos son combinaciones de dispositivos capaces de generar energía mecánica junto con generadores, que transforman la energía mecánica en energía eléctrica.

En este proyecto se considera el grupo electrógeno como el acople de un generador al movimiento generado por un motor térmico. Este aporte de energía mecánica también se puede realizar mediante turbinas eólicas, turbinas hidráulicas, volantes de inercia, etc. Sin embargo los motores son una opción de menor coste, con un tamaño y peso que se pueden adecuar mejor a este proyecto.

El sistema constaría de un motor térmico, que mediante un acople pueda aportar la energía mecánica necesaria al generador. Dependiendo de la corriente de salida del generador, se precisará la instalación de rectificadores u otros dispositivos para tratar la corriente obtenida.

1.1 El generador eléctrico

Los generadores son máquinas eléctricas, como los motores eléctricos. Así, la definición básica es que un motor eléctrico puede convertirse en generador eléctrico si hacemos girar el rotor de la máquina, que inducirá en el estator una corriente y tensión que luego se puede aprovechar para alimentar una carga.

El principio de funcionamiento de un generador eléctrico es el mismo que el del motor eléctrico, pero inverso. En un generador eléctrico la energía mecánica es transformada en energía eléctrica mediante la interacción de los campos electromagnéticos del estator y rotor de la máquina.

Existen dos tipos de generadores: Los generadores de corriente continua, comúnmente conocidos como dinamo y los generadores de corriente alterna, más conocidos como alternadores.

En la actualidad, la mayoría de generadores eléctricos son de corriente alterna. Esto se debe a la simplicidad para convertir un motor eléctrico en un generador eléctrico y la facilidad para la conversión de corrientes alterna a altas tensiones para evitar pérdidas en la distribución de la corriente.

1.1.1 Generador eléctrico de gasolina

Los generadores eléctricos a gasolina suelen usarse en aplicaciones donde se de poco uso y de forma no muy continua. Principalmente esto se debe a que su régimen de trabajo suele ser a muy altas vueltas y por eso se recomiendan usos intermitentes de cuatro horas máximo.

Existen generadores de estas características para potencias muy pequeñas, a diferencia de los generadores eléctricos con motores diésel, que se suelen utilizar más en aplicaciones de mayor potencia.

1.1.2 Generador eléctrico diésel

Acostumbran a utilizarse en aplicaciones de mayor potencia y un uso más continuado. Son motores que trabajan a mayores presiones internas y por lo tanto son más duros y robustos. También trabajan a un régimen más bajo de velocidades debido a sus características de funcionamiento (menos rpm que los motores de gasolina).

1.1.3 Ventajas y desventajas generador eléctrico diésel y/o gasolina

Los motores de gasolina son más económicos y tienen un coste de mantenimiento menor que los motores diésel.

Debido a que los motores diésel trabajan con presiones mayores y tienen una construcción más resistente, los motores de gasolina son más ligeros y producen menos ruido.

Sin embargo, los motores de gasolina tienen un mayor consumo, añadido a que el precio de la gasolina es ligeramente superior al del diésel.

Además, el menor consumo de los motores diésel hace que estos puedan conseguir una mayor autonomía que los de gasolina para un depósito de las mismas dimensiones.

1.2 Dimensionado y selección de los componentes del grupo electrógeno

En primera instancia, el enfoque de este proyecto es conseguir un sistema de propulsión híbrido (motor eléctrico alimentado por grupo electrógeno) nutriéndose del trabajo realizado por Oriol Gallemí en el desarrollo de un grupo electrógeno de pequeñas dimensiones y gran potencia.

En su trabajo, el autor coge el motor de combustión interna más pequeño disponible en el mercado, en particular el Honda GX25 al cual le acopla un generador asíncrono Mavilor. La corriente obtenida es modificada posteriormente mediante un rectificador AC/DC para obtener corriente continua que permita cargar baterías.

Se han consultado las especificaciones del motor donde se dice que éste es un motor de 4t de gasolina con una cilindrada de 25 cm³. Se explicita que el máximo rendimiento del motor se da cerca de las 7000 rpm. (Honda)



Ilustración 15: Motor gasolina Honda GX 25. (Honda)

El motor honda GX 25 tiene un consumo de 0,54 L/h a 7000 rpm y monta un depósito de 0,58L. Es decir, que para las condiciones de trabajo en las que se requeriría al motor (las máximas rpm para acercarse al punto de rendimiento óptimo del motor, cerca de las 7000 rpm), la autonomía que brindaría el equipo es de poco más de 1h. (Honda)

Según las especificaciones aportadas por Oriol, el grupo, con tan solo 4kg de peso en total, es capaz de aportar 650W de potencia, con 33V en corriente alterna y 45V en corriente continua.

En sus ensayos, para velocidades del motor Honda entre 6100 y 6650 rpm, puede observarse que el grupo solo aporta corriente de carga a la batería cuando la tensión es mayor en el grupo que en el acumulador. Los resultados que obtuvo el autor se recogen en el Anexo 1.

Según esto, parece que la corriente aportada a la batería solo depende de la diferencia entre las tensiones del generador y la batería, respectivamente. Conforme aumenta la velocidad del motor, aumenta la tensión proporcionada por el generador.

Así, cuanto mayor es la diferencia entre tensión generada por el grupo y la tensión de alimentación del acumulador, mayor es la corriente que se aporta.

Si consideramos la tensión que suministra el generador de Oriol en corriente continua y dividimos la potencia suministrada entre ésta, tenemos:

$$P = V \cdot I \rightarrow I = \frac{P}{V}, \quad I = \frac{650}{45} = 14,4 \text{ A}$$

Así, el grupo es capaz de generar 14,4A a 45V en corriente continua. En los resultados de los ensayos de Oriol, para alimentar una batería a 45V dice que el generador aporta 11A de corriente.

Para conseguir una mayor corriente, debería aumentar la diferencia entre ambas tensiones, pero llega un momento que la corriente aumenta tanto que el sistema se sobrecarga y no puede funcionar, debido a que las bobinas del generador se sobrecalientan al circular una corriente tan alta por ellas.

2. Ensayos realizados al grupo electrógeno

Con el fin de determinar la viabilidad del grupo electrógeno dimensionado y caracterizado por Oriol Gallemí se realizan varios ensayos, a partir de los cuales se obtiene información sobre los consumos del motor, el aporte energético que se consigue, etc.

El objeto de estudio es un grupo electrógeno ensamblado por Oriol que está conformado por un motor Honda GX de gasolina de 25 cm³ al cual se le acopla un alternador de 650W de potencia nominal Mavilor.

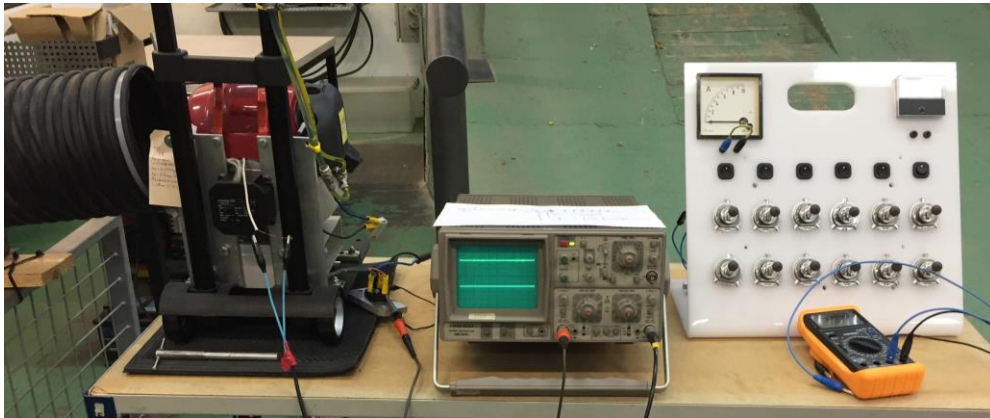


Ilustración 16: Montaje y elementos utilizados en el ensayo. (Fuente: elaboración propia)

A la salida de este generador se conecta un rectificador AC/DC que convierte la corriente de salida a corriente continua para poder alimentar baterías o el motor eléctrico. También se dispone de un extractor de aire que ventile los gases emitidos por el motor de combustión.

Para simular el consumo de una carga, se usa una caja que dispone de 12 lámparas conectadas en paralelo. Disponen de un interruptor cada dos lámparas para que sean conectadas o no.

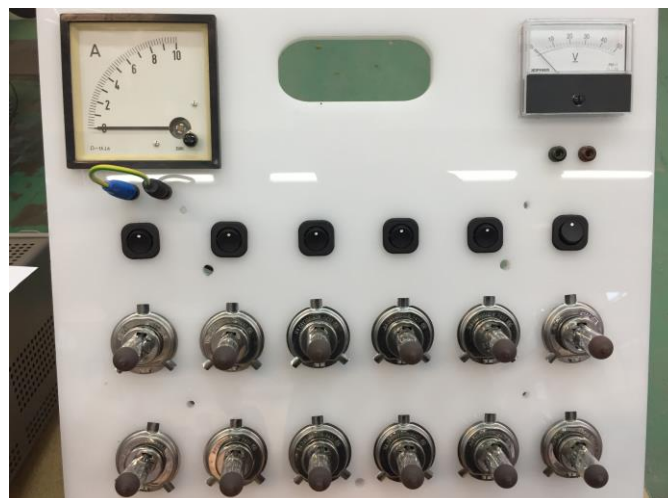


Ilustración 17: Cargas alimentadas por el grupo electrógeno. Cada carga consta de 2 lámparas. (Fuente: elaboración propia)

Además este montaje viene con un amperímetro y un voltímetro que permiten conocer el consumo eléctrico en función de las cargas que se encuentren conectadas.

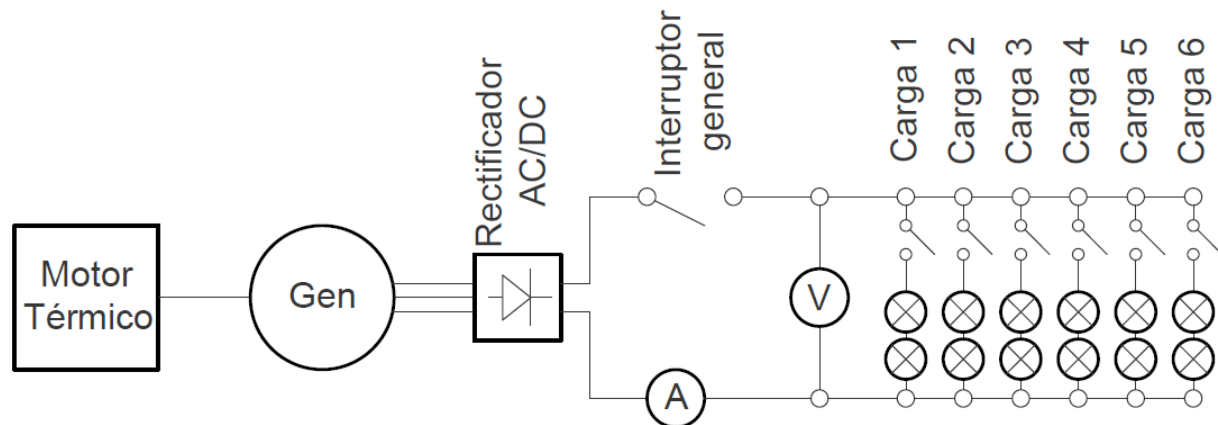


Ilustración 18: Esquema eléctrico instalación para los ensayos. (Fuente: elaboración propia)

Estos son los dispositivos que se utilizarán para medir las corrientes y tensión que aporta el grupo electrógeno. Por otra parte se dispone de un osciloscopio con un canal conectado en fase-fase a la salida del generador (es decir la corriente aún no se ha rectificado y transformado en corriente continua) y el otro canal en el sensor de la bujía del motor.



Ilustración 19: Sensor osciloscopio conectado antes del rectificador. fase-fase a la salida del generador. (Fuente: elaboración propia)

Para permitir una lectura del consumo del motor, el depósito de combustible del mismo es sustituido por una probeta conectada mediante un tubo a la alimentación del motor. Esta probeta dispone de varias marcas donde puede leerse el volumen de líquido que se contiene.

Por otra parte este montaje dispone de un tubo de ventilación acoplado, y que deberá contemplarse al realizar el consumo de combustible de cada etapa.

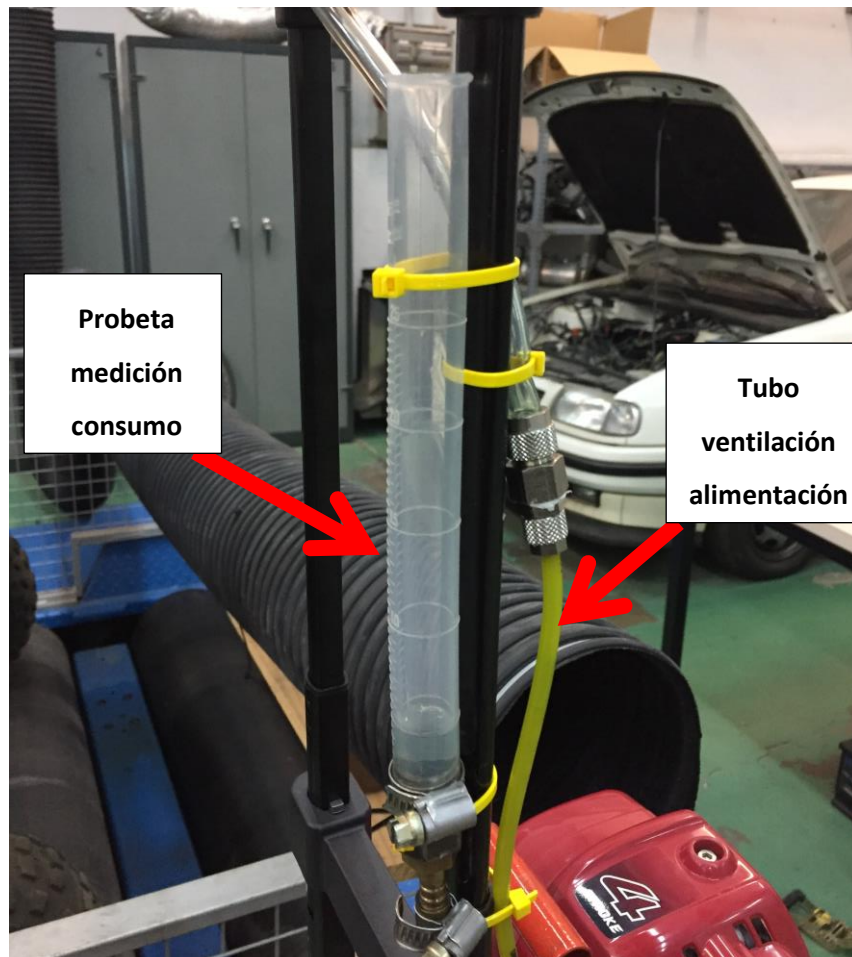


Ilustración 20: Probeta donde se introduce combustible para alimentación de motor térmico y tubo de ventilación de aire de la alimentación del motor. (Fuente: elaboración propia)

2.1 Ensayo 1. Estimación de las rpm en función de la tensión de salida del generador.

2.1.1 Planteamiento

Este primer ensayo se realiza en vacío ($I = 0A$), es decir no se conecta ninguna carga al grupo electrógeno (interruptor general cerrado y los interruptores de las diferentes cargas todos abiertos).

Mediante el uso del canal 1 del osciloscopio, el cual se encuentra conectado al sensor de la bujía del motor, puede estimarse la velocidad a la que gira el eje del motor.

Primeramente se enciende el motor y se regula la velocidad hasta conseguir la tensión deseada. Para este ensayo en particular se trabaja a 24V, 36V y 48V de tensión. Para cada una de las tensiones se obtiene una lectura de los picos de corriente que se suceden en la bujía del motor.

Como el motor Honda es de 4 tiempos, existe una relación de 1 pico de corriente en la bujía cada 2 vueltas de giro del eje del motor. Por otra parte, la resolución de la pantalla del osciloscopio es de 5 ms/div.

2.1.2 Cálculos realizados

Con una lectura, por ejemplo de 3,5 divisiones para una tensión de 24V puede estimarse que la chispa de la bujía se da cada 17,5 ms.

$$5 \text{ ms/div} \cdot 3,5 \text{ div} = 17,5 \text{ ms}$$

Y como se ha comentado anteriormente, esta chispa salta cada 2 vueltas. Es decir el motor trabaja a 2 vueltas cada 17,5 ms lo que supone:

$$2 \text{ vueltas} / 17,5 \text{ ms} = 0,1143 \text{ vueltas/ms} \cdot 1000 \text{ ms/1 s} \cdot 60 \text{ s/1 min} = 6857,14 \text{ rpm}$$

Con este simple cálculo puede estimarse la velocidad a la que gira el motor térmico en función de la tensión que hay a la salida del grupo electrógeno. A continuación se recogen los resultados obtenidos en los cálculos realizados, así como los datos recogidos en el ensayo.

2.1.3 Resultados Ensayo 1

En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos para este primer ensayo. En la última columna aparecen las rpm obtenidas según las observaciones realizadas con el osciloscopio. Como puede verse, para la tensión de 48V se ha calculado que el motor Honda gira a 9600 rpm, un resultado muy por encima del esperado.

Etapas	Tensión (V)	Picos corriente osciloscopio (div)	Factor resolución osciloscopio (ms/div)	Tiempo entre picos (ms)	Vueltas / chispa bujía	rpm motor Honda GX
Etapas 1.1	24 V	3,5	5	17,5	2	6857,1
Etapas 1.2	36 V	3	5	15	2	8000,0
Etapas 1.3	48 V	2,5	5	12,5	2	9600,0

Tabla 4: Resultados del Ensayo 1. (Fuente: elaboración propia)

2.2 Ensayo 2. Estimación de la corriente y tensión de alimentación y de los consumos del motor Honda.

2.2.1 Planteamiento

Este segundo ensayo consta de varias etapas en las que se van conectando progresivamente las diferentes cargas (cada carga se compone de 2 lámparas) de las que se dispone.

Inicialmente se enciende el motor y se acelera hasta conseguir una tensión de 48V en la salida del rectificador, donde se tiene corriente continua. Llegados a este punto se conectan progresivamente las cargas por etapas de 1 minuto, cerrando el interruptor de cada grupo compuesto por dos lámparas.

Para cada etapa se toma una lectura del combustible inicial y final de la etapa, según la probeta donde está el combustible, y de la corriente y tensión que llegan a las cargas. Para medir los consumos de corriente y tensión se utilizan el amperímetro y voltímetro que se encuentran conectados en la placa de las lámparas.

Las etapas son 4. Para la primera etapa se cierra el interruptor que conecta las lámparas 1 y 2, que corresponden a la carga 1. En la segunda etapa del ensayo, se conectan las cargas 1 y 2 (un total de 4 lámparas) y así sucesivamente en las cuatro etapas.

Etapas	Cargas conectadas
Etapas 2.1	Carga 1
Etapas 2.2	Cargas 1 y 2
Etapas 2.3	Cargas 1 a 3
Etapas 2.4	Cargas 1 a 4

Tabla 5: Etapas del Ensayo 2. (Fuente: elaboración propia)

2.2.2 Cálculos realizados

Para determinar el consumo de cada etapa debe considerarse tanto el volumen de combustible consumido en la probeta (de fácil lectura) como el combustible consumido que se encuentra en el tubo de ventilación de la alimentación del motor. Este tubo tiene un diámetro interno de 2,5 mm aprox.

Para calcular el combustible de la probeta consumido es fácil. Se calcula la diferencia entre el volumen de combustible inicial y el final de una etapa. Por ejemplo en la Etapa 2.1 el volumen de combustible antes de empezar la prueba era de 20 ml y al final de 15,5 ml.

$$V_{inicial} - V_{final} = 20 - 15,5 = 4,5 \text{ ml}$$

Estos 4,5 ml es el volumen de gasolina consumido en esta primera etapa.

A continuación se procede a calcular el volumen consumido total, sumándole el volumen de gasolina consumido por el tubo de ventilación.

1 ml de combustible en la probeta equivale a una altura de 5 mm de tubo. Para este caso particular el descenso de la marca de combustible de la probeta es de:

$$V_{inicial} - V_{final} = 20 - 15,5 = 4,5 \text{ ml} \cdot 5 \text{ mm} / 1 \text{ ml} = 22,5 \text{ mm}$$

Si la sección del tubo de ventilación es circular tenemos, con un diámetro interno de 2,5 mm:

$$\text{Sección tubo} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{2,5}{2}\right)^2 = 4,91 \text{ mm}^2$$

Multiplicando este resultado por la diferencia de altura obtenida para el consumo de esta etapa, obtenemos el volumen de combustible consumido en el segundo tubo:

$$4,91 \text{ mm}^2 \cdot 22,5 \text{ mm} = 110,48 \text{ mm}^3 \cdot 1 \text{ cm}^3 / 1000 \text{ mm}^3 = 0,11 \text{ cm}^3 \equiv 0,11 \text{ ml}$$

Finalmente, sumando ambos consumos se obtiene el consumo total de la etapa:

$$4,5 \text{ ml} + 0,11 \text{ ml} = 4,61 \text{ ml}$$

Conocido el volumen de gasolina que se consume en una etapa se puede estimar la potencia de entrada en el motor térmico, que permita conocer un pseudo-rendimiento general del sistema en base a la potencia de salida del grupo.

La densidad energética volumétrica de la gasolina es de 34,8 MJ/l, donde 1J equivale a 1W·s.

$$34,8 \text{ MJ/l} \cdot 10^6 \text{ J} / 1 \text{ MJ} \cdot (4,61 / 1000) \text{ l} = 160443,5 \text{ J}$$

Esta es la energía que se desprende al quemar el volumen de combustible consumido en la Etapa 2.1. Este volumen de combustible se consume durante 60 segundos, obteniendo la potencia (en vatios) de entrada del sistema:

$$160443,5 \text{ J} / 60 \text{ s} = 2674,1 \text{ W}$$

Para el cálculo de la potencia de salida, dado que tenemos corriente continua la potencia es igual a:

$$P = V \cdot I = 42 \text{ V} \cdot 2 \text{ A} = 84 \text{ W}$$

El rendimiento aproximado del sistema para esta etapa es de:

$$\eta = 84 \text{ W} / 2674,1 \text{ W} \cdot 100 = 3,1\%$$

2.2.3 Resultados Ensayo 2

En la siguiente tabla se recogen los principales datos y resultados obtenidos en este segundo ensayo. Todos los datos tratados para obtener esta información se recogen en detalle en el Anexo 1.

Etapa	Cargas conectadas	Horas (hh:mm)	Tensión (V)	Corriente (A)	Consumo etapa (ml)	Autonomía (depósito 0,8L)(min)	Rendimiento Etapa (%)
Etapa 2.1	Carga 1	18:29	42	2	4,61	173,52	3,1
Etapa 2.2	Cargas 1 y 2	18:30	38	3,9	3,07	260,28	8,3
Etapa 2.3	Cargas 1 a 3	18:31	34	4,7	2,05	390,42	13,4
Etapa 2.4	Cargas 1 a 4	18:32	30	6,4	3,59	223,10	9,2

Tabla 6: Resultados del Ensayo 2 (Fuente: elaboración propia)

2.3 Ensayo 3. Estimación de la corriente y tensión de alimentación y de los consumos del motor Honda (2).

2.3.1 Planteamiento

Al final de la Etapa 2.4 del Ensayo 2, se acaba el combustible, impidiendo seguir con el motor en funcionamiento. Se apaga el motor, se rellena de combustible la probeta y se procede a seguir con los ensayos.

Este tercer ensayo es la continuación del anterior. En las siguientes etapas se vuelven a tomar medidas de la corriente y tensión para las cargas de la 1 a la 4 (un total de 8 lámparas) y progresivamente se siguen conectando cargas por etapas de un minuto.

Se realiza exactamente el mismo proceso que en el ensayo anterior, pero con más cargas.

Etapa	Cargas conectadas
Etapa 3.1	Cargas 1 a 4
Etapa 3.2	Cargas 1 a 5
Etapa 3.3	Cargas 1 a 6

Tabla 7: Etapas del Ensayo 3. (Fuente: elaboración propia)

2.3.2 Cálculos realizados

Los cálculos realizados en este ensayo son los mismos que en el ensayo anterior, para los datos obtenidos en este apartado.

2.3.3 Resultados Ensayo 3

Los resultados obtenidos en este ensayo se recogen a continuación. Al igual que para el Ensayo 2, todos los datos de este ensayo se recogen en detalle en el Anexo 1.

Etapa	Cargas conectadas	Horas (hh:mm)	Tensión (V)	Corriente (A)	Consumo etapa (ml)	Autonomía (depósito 0,8L)(min)	Rendimiento Etapa (%)
Etapa 3.1	Cargas 1 a 4	18:39	28	6,3	2,56	312,33	11,9
Etapa 3.2	Cargas 1 a 5	18:40	26	8	2,56	312,33	14,0
Etapa 3.3	Cargas 1 a 6	18:41	24	9	2,56	312,33	14,5

Tabla 8: Resultados del Ensayo 3. (Fuente: elaboración propia)

2.4 Ensayo 4. Estimación de la corriente y de los consumos del motor Honda manteniendo la tensión constante ($V=48V$).

2.4.1 Planteamiento

Para este último ensayo la idea es conocer, en primera instancia, el consumo del motor cuando se intenta mantener la tensión conforme se van conectando las diferentes cargas al grupo.

Etapa	Cargas conectadas
Etapa 4.1	Carga 1
Etapa 4.2	Cargas 1 y 2
Etapa 4.3	Cargas 1 a 3
Etapa 4.4	Cargas 1 a 4
Etapa 4.5	Cargas 1 a 5

Tabla 9: Etapas del Ensayo 4. (Fuente: elaboración propia)

El procedimiento, es el mismo que en los otros ensayos. Sin embargo, en este caso, para cada etapa antes de empezar se regula la velocidad del motor hasta conseguir la tensión de alimentación de las cargas de 48V.

Una vez la tensión se encuentra en ese rango, se conectan las cargas correspondientes durante un minuto. Se toman datos del combustible al principio y al final de cada etapa y se registra la tensión y corriente que consumen las cargas.

2.4.2 Cálculos realizados

Al igual que en los anteriores ensayos, en este se calculan los consumos y rendimientos con la misma metodología seguida en los otros ensayos.

2.4.3 Resultados Ensayo 4

Los resultados obtenidos en este ensayo se recogen a continuación. Al igual que para los ensayos anteriores, todos los datos de este ensayo se recogen en detalle en el Anexo 1.

Etapa	Cargas conectadas	Horas (hh:mm)	Tensión (V)	Corriente (A)	Consumo etapa (ml)	Autonomía (depósito 0,8L)(min)	Rendimiento Etapa (%)
Etapa 4.1	Carga 1	18:53	48	2,2	3,59	223,10	5,1
Etapa 4.2	Cargas 1 y 2	18:55	48	4,4	4,61	173,52	7,9
Etapa 4.3	Cargas 1 a 3	18:58	48	6,7	5,12	156,17	10,8
Etapa 4.4	Cargas 1 a 4	19:01	48	8,6	5,12	156,17	13,9
Etapa 4.5	Cargas 1 a 5	19:05	40	10	5,12	156,17	13,5

Tabla 10: Resultados del Ensayo 4. (Fuente: elaboración propia)

Para este último ensayo también se ha comparado los resultados obtenidos en este proyecto con los obtenidos por Oriol Gallemí. Se han localizado los puntos de trabajo de las Etapas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 en la tabla de valores proporcionada por el autor. Esto se recoge en el Anexo 1.

Sin embargo el grupo electrógeno no ha sido capaz de soportar las 6 cargas y mantener la caída de tensión, con el correspondiente aporte de corriente. Esto ha impedido terminar este ensayo según lo previsto, que era conectar las 6 cargas.

3. Placas solares

Con el fin de aumentar la autonomía de la embarcación se pretende instalar un sistema de placas solares capaz de recargar las baterías que estén en desuso o aumentar la potencia suministrada al motor. Dado que las placas solares deberían instalarse en la cubierta de la embarcación, el espacio necesario para su instalación viene definido por las formas del casco en sí.

Los paneles solares fotovoltaicos son dispositivos capaces de transformar la energía solar en electricidad. Las placas solares están conformadas por un número determinado de células solares, donde se transforma la energía solar en electricidad, las cuales se conectan en serie hasta conformar la placa solar. Una placa solar con 20 celdas, podrá suministrar más energía que una de 10 celdas, ya que al disponer de más superficie donde incida el sol será capaz de transformar más energía. Así, cuanto más superficie expuesta al sol se tiene, más potencia se podrá suministrar al sistema.

Existe también un tipo de paneles solares determinados térmicos, los cuales aprovechan la energía luminosa para generar calor y calentar el agua que contienen en su interior. No se considera la posibilidad de instalar este tipo de paneles ya que no es un requisito del proyecto conseguir calentar agua. En otras aplicaciones es una buena opción a tener en cuenta, pero no en este proyecto.

3.1 Principio de funcionamiento

El principio en el que se basa el funcionamiento de las placas solares es el conocido efecto fotoeléctrico, que describe la emisión de electrones en materiales metálicos susceptibles, al incidir una radiación electromagnética sobre ellos. Estos materiales se conocen como metales fotoeléctricos.

Una parte de la celda solar se construye con un material semiconductor al que le sobran electrones (carga negativa, semiconductor del tipo N) y otra parte se hace con un material semiconductor que le faltan electrones (con carga positiva o huecos en sus átomos, semiconductor tipo P). Los materiales semiconductores, como el silicio, se denominan así por el hecho de que pueden actuar como conductores o aislantes según el estado en el que se encuentran.

Al unirlos y llegar luz, los fotones de la luz ceden su energía a los electrones del semiconductor N moviéndose estos desde la parte N a la P por el circuito eléctrico externo a la celda, generando una corriente eléctrica capaz de abastecer una carga determinada.

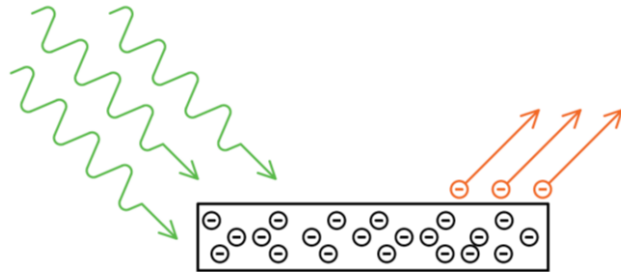


Ilustración 21: Representación del fenómeno fotoeléctrico. Al incidir onda electromagnética en material fotoeléctrico los electrones de éste entran en un estado de excitación generando una corriente. (Fuente: elaboración propia)

3.2 Tipos de celdas solares

Existen tres tipos principales de celdas solares fotovoltaicas, que se diferencian en el material del cual están compuestos los paneles que las conforman.

Existen las celdas solares policristalinas, compuestas de placas de silicio que se cortan como lingotes. Consiguen eficiencias de entre el 15 y el 20%.

Las celdas solares flexibles, que son 100 veces más delgadas que las clásicas de silicio amorfo. Aunque la mayoría todavía se producen en silicio, empiezan a verse de otros materiales como telururo de cadmio y diselenuro de cobre-indio-galio. Debido a que son extremadamente delgados, ligeros y flexibles, las celdas solares de segunda generación pueden ser laminadas en distintos materiales como metales, vidrio y plástico. Aunque presentan la ventaja de ser flexibles, son menos eficientes que las clásicas (alrededor de un 7% de eficiencia).



Ilustración 22: Celda solar fotovoltaica flexible. (Dexen.com)

Por último, un tipo de celdas que se encuentra principalmente en desarrollo son las que se basan en polímeros orgánicos. Suelen estar hechas de silicio amorfo, polímeros orgánicos, cristales de perovskita, etc. Hechas de múltiples capas de diferentes materiales semiconductores que los haría más baratos, más eficientes y más prácticos que los otros tipos de celdas. A priori parece que pueden conseguir rendimientos de hasta el 30%.

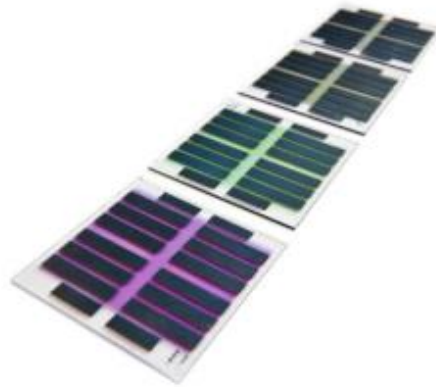


Ilustración 23: Celda solar fotovoltaica de material polimérico. (Dexen.com)

3.3 Dimensionado y selección de las placas solares

La selección de las placas solares se realizará según las características de carga de la batería Ritar de 40 Ah, seleccionada como posible batería secundaria.

Se han consultado diferentes opciones de placas solares capaces de suministrar una tensión de 12V y una corriente de 12A, sin embargo debido a las grandes dimensiones de estas se hace imposible instalar una placa solar en la embarcación.

Una posible solución es conseguir celdas solares de forma independiente y realizar las conexiones pertinentes para constituir una placa.

Se ha encontrado una celda solar policristalina de silicio, que por ejemplo genera 2W a 6V. Esto significa unos 0,35A de corriente, tiene un precio de unos 7€. Conectando 12 paneles obtendríamos 4,2A. Y eso sería a una tensión de 6V. Para conseguir los 12V de tensión a los que trabaja la batería necesitaríamos 24 paneles en total.

Cada uno de estos paneles tiene unas dimensiones de 13,4cm x 11cm. Tener 24 paneles de estas características, por ejemplo, significa ocupar una superficie total de más de 0,7m². Dado que el prototipo dispone de 1m² de superficie útil para instalar los paneles solares, puede conseguirse una configuración que permita esta instalación.

Con esta instalación a penas se conseguirían 4,2A a 12V inservibles para cargar la batería deseada. Evidentemente, considerando unas condiciones perfectas y que el dispositivo trabaja al rendimiento esperado.

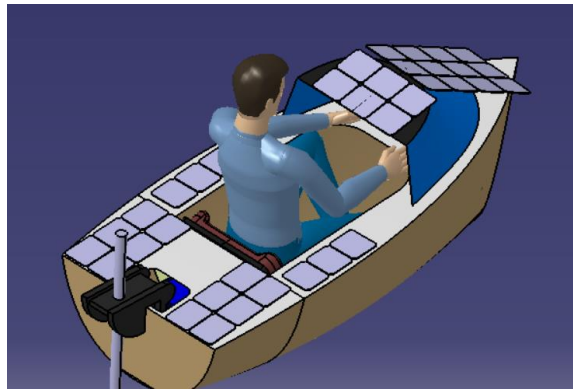


Ilustración 24: Posible distribución de 36 celdas solares en el prototipo 1. (Fuente: elaboración propia)

Se han probado varias disposiciones de paneles solares en el prototipo. En la imagen anterior, se muestra un ensamblaje realizado a modo de comprobación donde se han instalado hasta 36 paneles solares. De esta forma se conseguirían 6,5A a 12V, unos 78W de potencia y tendría un coste aproximado de 252€, más el coste de hacer toda la instalación, conectarlas, etc. Además de la poca eficiencia que consiguen estos dispositivos, descartando definitivamente la opción de incorporar este tipo de dispositivos en el prototipo.

4. Pila de combustible

En el trabajo realizado por Javier Almarza Cano sobre el *Diseño y Fabricación de una Pila de Combustible de Hidrógeno de Baja Potencia*, el autor consigue diseñar y construir una pila de combustible de hasta 4W, 4V con corriente de 1A; con unas dimensiones de tan solo 8x6x6 cm y 0,5 kg de peso. El coste aproximado del diseño y producción de un elemento se aproxima a los 5.000 € para producción en serie. (Almarza, 2010)

4.1 Principio de funcionamiento

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que, al igual que las baterías, convierte directamente en corriente eléctrica la energía química de un reactivo. Sin embargo, ambos sistemas presentan una gran diferencia; mientras que las baterías son acumuladores de energía y sólo pueden suministrar energía eléctrica mientras no se agoten los reactivos químicos almacenados en su interior (deben haber sido cargadas previamente), las pilas de combustible son capaces de proporcionar electricidad mientras les sea suministrado combustible (normalmente hidrógeno) desde una fuente exterior, sin más limitaciones que los procesos de degradación o mal funcionamiento de los componentes.

En las pilas de combustible, como resultado de la reacción electroquímica que tiene lugar, únicamente se produce agua y electricidad, es decir, no existe ningún residuo perjudicial para el medio ambiente; a diferencia del impacto ambiental que suponen los combustibles fósiles, mayoritariamente utilizados en la actualidad, en la generación de energía eléctrica. Este es uno de los motivos principales por los que en los últimos años se ha impulsado el desarrollo de este tipo de pilas, es un sistema de conversión de energía limpio y sostenible.



Ilustración 25: Esquema funcionamiento pila de combustible. (Fuente: elaboración propia)

Existen diversos tipos de pilas de combustible,

- PEMFC (pilas de membrana de intercambio de protones o de membrana polimérica)
- AFC (pilas de combustible alcalinas)
- PAFC (pilas de ácido fosfórico)
- MCFC (Pilas de carbonato fundido)
- SOFC (pilas de óxido sólido)

Su principal diferencia radica en el tipo de electrolito que presentan. Actualmente las más desarrolladas en el mercado son las PEMFC. (Almarza, 2010)

4.2 Ventajas y desventajas de las pilas de combustible

Una de las ventajas de las pilas de combustible es la versatilidad de su fuente de energía, donde se tolera un nivel de pureza del 20-30%. (Almarza, 2010)

La mayor necesidad en las pilas de combustible es encontrar un combustible alternativo al hidrógeno, el cual es costoso de producir y peligroso de almacenar, ya que es una sustancia explosiva. Para almacenarlo en estado gaseoso se necesitan grandes depósitos que permitan almacenarlo sin peligro. Si lo almacenamos en forma líquida debemos trabajar con temperaturas muy bajas. Aunque también puede emplearse cualquier mezcla gaseosa de combustible que contenga hidrógeno (es muy común utilizar hidrocarburos). (Almarza, 2010)

Este combustible a base de hidrocarburos se cataliza previamente para obtener una mayor concentración de hidrogeno que luego se aporta a la pila. Con este método se evade en cierta medida el problema del almacenamiento del combustible, siendo éste metano, butano, propano, etc. que es mucho más fácil de almacenar.

El oxígeno necesario para llevar a cabo la reacción es abundante en la atmósfera y su abastecimiento no plantea problemas.

Las pilas de combustible, además, requieren de un catalizador que permita acelerar el proceso de reacción. Este catalizador acostumbra a ser de platino, una sustancia que encarece el coste del elemento.

Algunas de las ventajas que presentan estos dispositivos son su bajo mantenimiento, dado el hecho de que no tienen partes móviles, susceptibles al desgaste; hace que el mayor limitante de su vida útil sea el envenenamiento de sus catalizadores. Consecuentemente también presentan un bajo nivel de ruido.

Un alto rendimiento, cercano al 30%, pero que aprovechando el calor generado por la pila puede alcanzar un rendimiento aproximado del 80%. Además de una contaminación mínima al no producir sustancias nocivas en las reacciones que se dan en la pila; sin tener en cuenta el posible origen del combustible, los mecanismos utilizados para la obtención del mismo, etc. (Almarza, 2010)

4.3 Dimensionado y selección de la pila de combustible

El precio de una pila de combustible de 200 Watts con un voltaje nominal de 21 Volts hoy en día ronda los 2.000 euros. Tan solo mide 8,5 cm x 14,5 cm x 11 cm y pesa cerca de 0,4kg. (Alibaba.com)

Si este dispositivo es capaz de aportar 200 W a 21 V significa que;

$$200\text{ W}/21\text{ V} \approx 9,5\text{ A}$$

Con un dispositivo de estas características se puede conseguir una corriente de 9,5 A a 12V, que podría ser perfectamente aprovechable para realizar un ciclo de carga a velocidad media de la batería comentada en el apartado anterior de 40 Ah. Con dos dispositivos en serie se conseguirían unos 19A de corriente con lo que podría realizarse una carga rápida de la batería sin problemas. Todo y con eso el tiempo mínimo estimado de carga de la batería es de 6h. tiempo de autonomía del que no se dispone.

Sin embargo esto requeriría de un depósito de hidrógeno o algún componente sustitutivo que se pueda catalizar previamente para alimentar a la celda de hidrógeno.

Los principales inconvenientes de las pilas de combustible son, entre otros, que tienen un arranque lento y una respuesta lenta a variaciones de carga, los mecanismos de regulación son complejos y los costes de producción son todavía demasiado altos. Aunque estos no son problemas a priori para la función a la que se destinarían en un proyecto como este, recargar acumuladores, se descarta su aplicación para este proyecto, pero es una línea de estudio interesante para futuros proyectos.

5. Resumen del contenido del Capítulo IV

- Se descarta la posibilidad de instalar placas solares a priori, por ser una inversión considerablemente alta que no aporta muchos beneficios al sistema.
- El uso de pilas de combustible es una opción muy viable para un dispositivo de las características del de este proyecto. Sin embargo, esta es una tecnología todavía demasiado joven y con un coste muy elevado debido a la naturaleza de algunos de sus componentes y el combustible necesario.
- A partir del trabajo realizado por Oriol Gallemí, implementar el diseño del grupo electrógeno que realizó, con motor térmico Honda GX25 y generador eléctrico Mavilor de 650W de potencia nominal.
 - En primera instancia, el grupo sería capaz de alimentar al motor eléctrico sin problemas, seleccionando un generador con las características adecuadas a la aplicación que se requiere.
 - Con un peso total de 5kg máximo el coste del conjunto podría variar entre los 500 y 2.000 €.
- El grupo electrógeno dimensionado en este Capítulo, solo consigue una autonomía de 1h. Aunque esto viene determinado por el consumo del motor y el depósito que monta, y que aumentando la capacidad del depósito podría conseguirse mayor autonomía, se prefiere no forzar a trabajar periodos prolongados al motor. La tarea radicará en buscar unas baterías que puedan aportar una autonomía extra al sistema.

CAPÍTULO V. Acumuladores eléctricos. Baterías, condensadores y supercondensadores

Como fuente de alimentación alternativa al grupo electrógeno, se estudia la posibilidad de instalar una o más baterías que permitan el aporte energético necesario para el motor eléctrico.

1. Baterías y/o acumuladores electroquímicos

Los acumuladores electroquímicos son dispositivos capaces de acumular y proporcionar energía mediante la energía química que contienen. Esto se consigue mediante la transformación de energía química y eléctrica que se produce en su interior, a través de una serie de reacciones de oxidación-reducción o redox, en las cuales se produce el intercambio de electrones y cargas eléctricas entre las sustancias intervinientes; capaces de generar una corriente que luego puede aprovecharse para alimentar una carga.

En función de si estas reacciones son reversibles o no, la batería es recargable o no, así se distinguen dos tipos de baterías: las primarias y las secundarias. Las baterías primarias, también denominadas pilas, se basan en reacciones químicas difícilmente reversibles y que consecuentemente, no pueden ser recargadas de una manera eficiente. Las baterías secundarias o acumuladores se basan en reacciones redox reversibles y, por lo tanto, pueden ser recargadas cuando se hace circular la corriente en sentido contrario al de utilización o descarga. Existe un tercer tipo denominadas baterías híbridas, las cuales están constituidas por una batería primaria de gran capacidad y una secundaria que permite las puntas de corriente. Este tipo de baterías tampoco permiten recargas aunque consiguen gran capacidad y gran duración. (Boix, Oriol; Sainz, Luis; Córcoles, Felipe; Suelves, Francisco J., 2009)

1.1 Principio de funcionamiento

Las baterías están formadas por uno o más elementos electroquímicos iguales, eléctricamente conectados y cubiertos por una envolvente; dicho conjunto se denomina celda. Cada celda está compuesto de dos electrodos, un ánodo y un cátodo; compuestos de diferentes materiales inmersos en un electrolito, que puede ser líquido, gelatinoso o un sólido poroso impregnado. En el ánodo o polo positivo, se produce la reacción de reducción; que suele estar constituido de cobre, níquel, mercurio, manganeso, plomo, carbón, acero o plata. En el cátodo o polo negativo se produce la oxidación; suele estar compuesto de zinc, cadmio, plomo o magnesio.

El electrolito es el medio en el que se facilita la circulación y el intercambio de iones entre ambos electrodos. Según el estado en el que se encuentra el electrolito, se distinguen dos tipos de baterías: por una parte, las que presentan un electrolito líquido, el cual debe ir reponiéndose; y por otra parte, las baterías secas o estancas, con un electrolito gelificado o en forma de sólido impregnado (esta tecnología se conoce como AGM, del inglés *Absorbed Glass Mat*).

Cuando se conecta una batería a una carga, la tensión en sus bornes disminuye. Así una batería puede describirse como una fuente de tensión ideal (V) y una resistencia interna (R_i). Esta resistencia interna del esquema equivalente de la batería es la suma de la resistencia del conexionado de los electrodos y una resistencia ficticia equivalente que depende de los parámetros electroquímicos de la misma en cada momento. El valor de esta resistencia interna depende del estado de carga, de su envejecimiento, etc. (Boix, Oriol; Sainz, Luis; Córcoles, Felipe; Suelves, Francisco J., 2009)

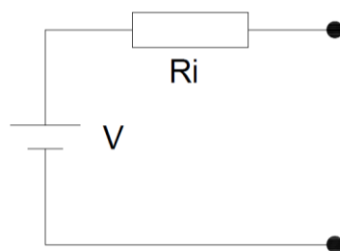


Ilustración 26: Esquema equivalente de una batería. (Fuente: elaboración propia)

1.2 Características de funcionamiento

Cuando una batería se descarga, su tensión desciende. Se considera que una batería está descargada cuando la tensión que da en sus bornes alcanza un valor mínimo, a partir de la cual la tensión cae rápidamente. En ocasiones se emplea un valor superior, mínimo para la aplicación a la cual esté destinada la batería.

La capacidad de una batería da idea de la energía que puede entregar desde que está totalmente cargada hasta alcanzar la tensión mínima o residual. Esta característica de las baterías se mide en Amperios-hora (Ah); así una batería de 50Ah es capaz de proporcionar, en teoría, 50 Amperios durante 1 hora, 25 Amperios durante 2 horas o incluso 100 A durante 30 minutos. La realidad es que la capacidad depende de la velocidad de descarga (además de la temperatura y otras variables).

La capacidad de una batería también depende de su envejecimiento. Hablamos de vida útil de una batería como el tiempo que estima el fabricante para el correcto funcionamiento de la misma. Así para una batería que tenga una vida útil de 2 años, si esta se ha utilizado de forma correcta, quizá pasado este lapso de tiempo su capacidad se reduce al 40% de su valor nominal. (Boix, Oriol; Sainz, Luis; Córcoles, Felipe; Suelves, Francisco J., 2009)

Para poder comparar las diferentes baterías se ha establecido un criterio para indicar la capacidad de las baterías, mediante unos índices de descarga. Por ejemplo una capacidad de 50Ah C10 5A, nos indica que la batería podrá suministrar 5A durante 10 horas, 2,5A durante 20 horas, pero no podrá trabajar para una aplicación que requiera 10 amperios durante 5 horas. (Boix, Oriol; Sainz, Luis; Córcoles, Felipe; Suelves, Francisco J., 2009)

Aunque una batería esté desconectada y no se utilice, también se descarga cuando de forma espontánea se producen las reacciones electroquímicas de sus componentes, este fenómeno es conocido como autodescarga. Este fenómeno afecta a todo tipo de baterías independientemente de que sean recargables o no, y el grado de autodescarga depende de la temperatura ambiente y del tipo de batería. En las baterías secundarias el hecho de poder recargarlas permite lidiar en cierto grado con este problema.

1.3 Baterías secundarias

Estas son aquellas baterías que permiten ser recargadas y que se considerarán en este proyecto por varios motivos.

Las baterías primarias tienen menos peso y pueden generar una mayor energía.

Por otra parte las baterías secundarias son más caras pero permiten los ciclos de carga y descarga, manteniendo su aplicación mucho más tiempo, eliminando el coste de reponer la fuente de alimentación cada vez que se agote, que puede ser alto e incómodo.

Este tipo de acumuladores son los más comúnmente extendidos en las diferentes operaciones donde se requiera una fuente de alimentación constante. Los principales tipos de batería que se consideran en este proyecto se muestran a continuación.

1.3.1 Baterías de plomo-ácido

Este tipo de baterías son las más comúnmente utilizadas. El electrodo positivo puede ser de dióxido de plomo, plomo-antimonio o plomo-calcio y el negativo de plomo metal; el electrolito acostumbra a ser de ácido sulfúrico disuelto en agua, que puede estar en forma de líquido o gelificado. Este tipo de baterías pueden dar una tensión aproximada de 2 V por elemento o celda.

Las baterías de plomo ácido presentan un ánodo de dióxido de plomo y un cátodo de plomo metal. Dado que el plomo es débil físicamente, se modifica la composición añadiéndole otros elementos al plomo de los electrodos.

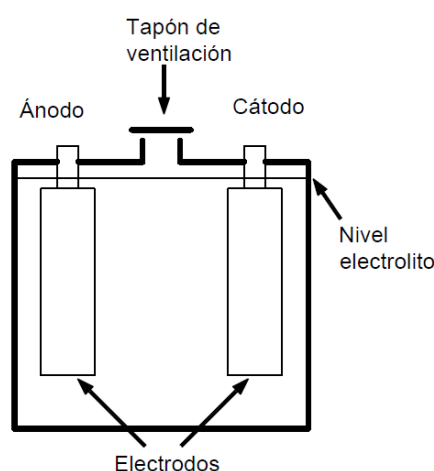


Ilustración 27: Croquis de la forma de una batería electrolítica. (Fuente: elaboración propia)

Las que son de plomo-antimonio consiguen que la batería tenga una mayor profundidad de descarga y una mayor tasa de ciclos de carga y descarga, lo que alarga la vida útil de la batería, aunque presentan una mayor autodescarga. Por otra parte, requieren que se les añada agua para la disolución que constituye el electrolito a menudo, con el consecuente mantenimiento que implica.

Las de plomo-calcio son aquellas en las que el plomo se encuentra combinado con el calcio. Gracias a su composición el calcio mejora la rigidez del plomo, lo que reduce la autodescarga; sin embargo la aleación de plomo calcio reduce la profundidad de descarga de la batería.

Dado que la batería tendrá una profundidad de descarga considerable, se descartan las baterías con aleación de plomo-calcio.

Para seleccionar la batería se hace una primera estimación de la capacidad necesaria a partir del consumo del motor y la autonomía deseada.

$$Autonomía (h) = \frac{Capacidad (Ah)}{Corriente consum.(A)} \rightarrow Capacidad = 1,5 h \cdot 35 A = 52,5 Ah$$

Con una batería de esa capacidad, podría alimentar al motor durante 1h y 30min, en teoría. Si bien en la práctica, según la corriente de descarga, la batería tendrá una capacidad u otra, y esto vendrá definido en las curvas de descarga de la batería.

A modo de ejemplo, el modelo DC12-90 de Ultracell es una batería que utiliza la tecnología AGM (electrolito en forma de sólido impregnado) de ciclo profundo que tiene una capacidad de 100 Ah. Mediante las curvas de descarga podemos saber la autonomía que da el fabricante en las especificaciones. Para el motor seleccionado se ha estimado un consumo de 35 A y la capacidad de esta batería es de 100 Ah, por lo tanto,

$$\frac{35 A}{100 Ah} = 0,35$$

Es decir una descarga 0,35C. En las curvas de descarga la descarga a 0.35C y estiman una autonomía de algo más de 2 horas.

Es decir, para una misma batería, según la corriente de descarga tendrá más o menos capacidad. Cuanto mayor es la corriente de descarga, menos capacidad. Por este motivo, se decide optar por la opción de conectar 2 baterías en paralelo, dada la alta corriente que habría que suministrar al motor si esta fuera su única fuente de alimentación.

En el mercado existen muchas baterías con diferentes características y aplicaciones. Para la aplicación de este proyecto, se ha centrado la búsqueda en modelos que utilizaran la tecnología AGM, para evitar mantenimiento, así como la necesidad de un espacio bien ventilado donde instalar la batería; y que sea de ciclo profundo. Se han encontrado distintos modelos de entre 35 y 100 Ah.

Con una capacidad de 35Ah la batería no podría aportar ni una hora de autonomía, así que deberá estudiarse una configuración con varias baterías. En el otro extremo, una batería de 100 Ah puede aportar una autonomía de más de dos horas. El rango de precios de estas baterías va des de los 100 a los 250€ y los pesos de 10 a 30kg, respectivamente.

En el **anexo XXX** se encuentra una tabla que recoge diferentes modelos considerados en el desarrollo de este proyecto.

1.3.3 Baterías de litio

Este último tipo presentan el mayor rendimiento entre todas las baterías convencionales. Sus pequeñas dimensiones y reducido peso consiguen una alta densidad energética. Son capaces de suministrar hasta 4,2 V por celda.

Este tipo de baterías tienen un principio de funcionamiento algo diferente a las de plomo-ácido, ya que basan su funcionamiento en un proceso de inserción-desinserción de iones. Así, son los iones presentes en el electrolito los que se desplazan acoplándose y desacoplándose de los electrodos. Presentan un cátodo de litio metal y un ánodo de un compuesto carbonoso; el electrolito suele estar formado por sales de litio. Durante el proceso de descarga, el electrodo negativo o cátodo se oxida liberando electrones e iones de litio que se mueven a través del electrolito hacia el electrodo positivo, donde se produce una reducción.

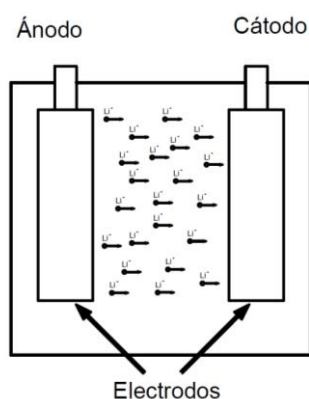


Ilustración 28: Esquema batería iónica. (Fuente: elaboración propia)

Aunque presentan un mínimo efecto memoria, su vida útil ronda los 3 años o 1000 ciclos de carga, a partir de este umbral la batería pierde considerablemente su capacidad nominal de suministrar potencia. Mientras que a bajas temperaturas pierden rendimiento, al estar compuestas de sustancias inflamables al trabajar a altas temperaturas existe un riesgo de que se recalienten e incluso que lleguen a explotar. Su fabricación es considerablemente costosa y la corriente suministrada a la salida de sus bornes acostumbra a ser inestable, por lo que requieren del montaje de convertidores para estabilizar dicha tensión.

Las baterías de litio-polímero de litio presentan una densidad energética aun mayor que las anteriores y una menor tasa de descarga. Por contrapartida resultan casi inútiles cuando se descargan por debajo de un mínimo de 3V. Éstas se diferencian de las de Li-ion por que presentan un electrolito litio-sal que no está contenido en un solvente orgánico, sino en un compuesto polimérico sólido como el óxido de polietileno.

Este tipo de electrolito presenta algunas ventajas como menor coste de fabricación, adaptabilidad a una amplia variedad de formas de empaquetado, mejor confiabilidad y mayor resistencia.

También existen las de litio fosfato de hierro, conocidas como LFP. Comparadas con las baterías tradicionales de ion litio, las de litio hierro fosfato son significativamente más baratas de producir. Son más estables bajo condiciones de trabajo adversas y aunque la reacción a los daños es similar a las de Li-ion, calentándose y liberando gas, las LFP no liberan llama ni explotan. Éstas presentan una tensión máxima por celda algo menor, de 3,3 V y una curva de descarga más estable que los tipos anteriores.

Existen en el mercado y en fase prototipo muchas otras baterías de este tipo, dado que al presentar los iones del metal disueltos en el electrolito, permiten la experimentación con materiales más inestables en fase metal. Como las de litio con ion manganeso u óxido de cobalto.

Actualmente son los acumuladores con mayor crecimiento en el mercado y mayor inversión en desarrollo y fabricación.

Los acumuladores iónicos requieren de un sistema de monitorización y control que prevengan los daños por sobrecarga o descarga profunda, permitiendo alargar la vida útil de la batería y evitar accidentes, conocido comúnmente como BMS (del inglés *Battery Management System*).

2. BMS (Battery Management System)

El BMS o sistema de gestión de baterías es un sistema electrónico que gestiona una batería recargable mediante tecnologías BUS, por ejemplo para impedir que la batería trabaje fuera de su área de operación segura, para permitir el seguimiento de su estado de carga, equilibrar la carga y descarga de las diferentes celdas que constituyen una batería y la obtención en general de información y parámetros que indiquen el estado de la batería.

Aun siendo el desarrollo de un BMS para una batería un estudio considerablemente amplio que no da tiempo de tratar en este trabajo, se explican ciertos conceptos relativos a este tipo de sistemas, los cuales son muy recomendables en ciertos tipos de batería como las de plomo-ácido, e imprescindibles en baterías del tipo ion-litio. Si el camino de desarrollo de este proyecto lleva al diseño de una batería construida por celdas, ésta requiere de un sistema de gestión de la batería para equilibrar cada celda en las cargas y descargas normales.

2.1 Funcionamiento del BMS

Muchas baterías están equipadas con sensores SoC (del inglés, *State-of-Charge*) que permiten conocer la carga remanente en la batería. Sin embargo, esto no permite una lectura completa del estado de la batería. Por otra parte, la capacidad es el indicador primario para el SoH de la batería (del inglés, *State-of-Health*) que también debe ser incluido en el BMS.

Así, conociendo estos dos indicadores, se puede conocer el estado de funcionamiento de la batería SoF (del inglés, *State-of-Function*); la lectura que nos permite conocer realmente el estado de la batería según la carga de la que dispone y la capacidad que tenga en ese momento; ya sea porque la capacidad se haya visto mermada con el tiempo, por un mal uso de los equipos de carga, descargas fuera de los parámetros de operación normales de la batería, etc. Sin embargo, la tecnología que pueda ofrecer esta información de manera eficiente y precisa todavía se encuentra en desarrollo. (BatteryUniversity, BatteryUniversity, 2018)

Cada química de los diferentes tipos de batería ofrece una única curva de descarga, que además se define según las características propias de la batería. Mientras que las baterías de plomo-ácido tienen una curva de descarga (tensión – capacidad de descarga) bastante pronunciada que permite conocer la situación de la batería de una forma relativamente precisa y, por consiguiente, la carga restante en la misma, las baterías alcalinas y las de iones de litio tienen una curva demasiado plana durante toda su descarga.

2.2 Cómo medir el estado de carga SoC

Existen distintos métodos para conocer el estado de carga de las baterías. A continuación se muestran los más sencillos. Este indicador es muy útil en la gestión de las baterías de plomo ácido, sin embargo en otros tipos de químicas se requieren otros parámetros para conocer el estado real de la batería y poder operar de manera eficiente con la batería.

2.2.1 Método por voltaje

Es el método más simple, pero puede llegar a ser poco preciso ya que los materiales de las celdas y las temperaturas pueden influir en el voltaje de las baterías. El momento más crítico para este método es cuando se tienen perturbaciones en el proceso de carga o descarga de una batería, donde el lector no podrá obtener un valor preciso del voltaje y por lo tanto la lectura no será válida. Para volver a un funcionamiento normal se recomienda dejar la batería desconectada durante al menos 24 horas, para las baterías de ácido plomo. (BatteryUniversity, BatteryUniversity, 2018)

En las baterías de plomo, durante el proceso de descarga se puede observar un descenso significativo de la tensión conforme aumenta la profundidad de descarga, hasta un final donde la tensión cae repentinamente.

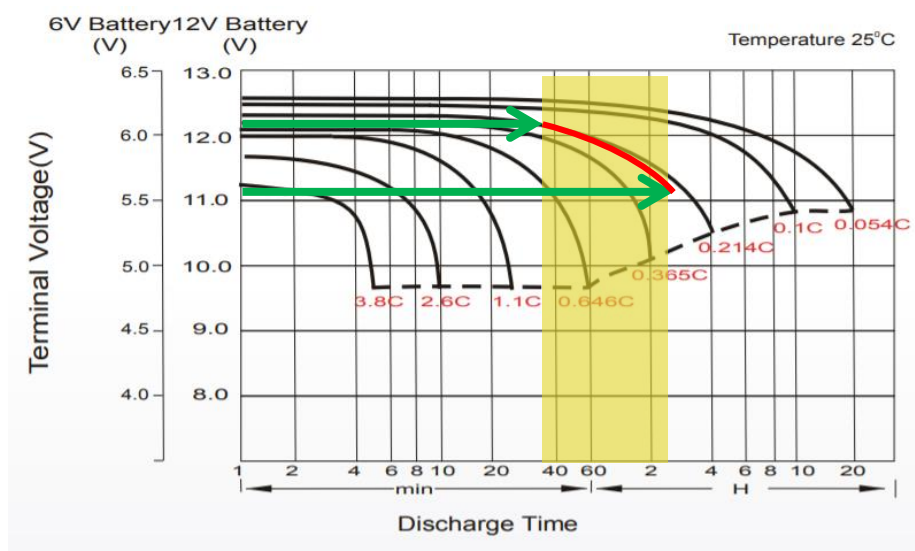


Ilustración 29: Curvas de descarga a diferentes corrientes para batería de plomo-ácido de 115Ah 12V.

(Autosolar.com)

En la figura anterior, puede verse que existe una considerable pendiente en la curva de descarga cuando la batería se aproxima a su nivel de carga mínima, antes de llegar a ese punto. Por ejemplo para una descarga de 0,214C durante las 2 horas sombreadas en amarillo la tensión baja algo más de 1V.

Esto permite hacer una estimación de la capacidad restante de la batería, según la tensión en la celda nos situamos en la curva de corriente a la cual se va a hacer la descarga y podemos estimar la capacidad restante. Este es un sistema de gestión simple y económico, pero que solo sirve para baterías que utilizan esta química.

En las baterías basadas en la química del níquel y las de ion-litio, durante el proceso de descarga la curva (tensión – capacidad de descarga) de tensión permanece casi constante hasta un punto de capacidad máxima en que la tensión cae repentinamente. Así, aun teniendo conocimiento del voltaje de descarga de la batería, es difícil conocer el estado real de descarga de este tipo de baterías. (BatteryUniversity, BatteryUniversity, 2017)

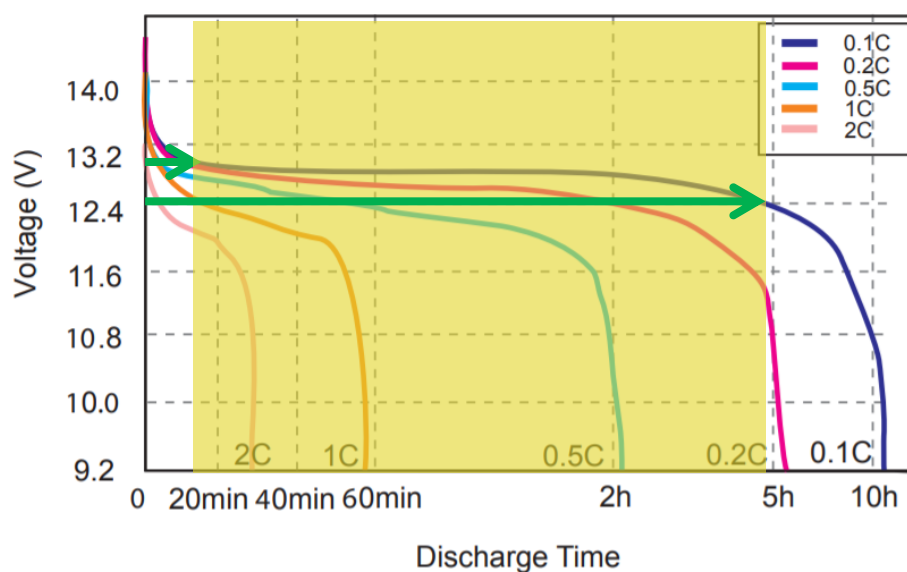


Ilustración 30: Curvas de descarga a diferentes corrientes para batería de litio hierro fosfato de 100 Ah 12V. (All batteries)

En la figura anterior puede verse la curva de tensión de descarga de una batería de tipo LiFePo para diferentes corrientes de descarga. Para una descarga en corriente 0,1C, des del principio de la descarga y durante cinco horas la tensión de la batería tan solo disminuye en 0,8V. Cuando la batería se encuentra próxima a la descarga total la tensión cae repentinamente.

Por este motivo las baterías de iones de litio requieren otros métodos para la gestión de su funcionamiento.

2.2.2 Hidrómetro

Este es un sistema alternativo a medir el SoC, pero solo aplicable en las baterías de plomo ácido. Su funcionamiento se basa en medir la gravedad específica del electrolito, siempre y cuando este esté en forma líquida, donde se sumergen los electrodos, la cual aumenta durante el proceso de carga y disminuye en la descarga. Mediante esta lectura se estima la carga restante en la batería. Es un método simple y relativamente preciso de conocer el estado de carga en este tipo de baterías. (BatteryUniversity, BatteryUniversity, 2017)

Esta información puede complementar a la obtenida según el método del voltaje, para una batería compuesta por celdas de plomo. Sin embargo tampoco es aplicable en baterías de ion litio.

2.3 Cómo medir el estado de salud de la batería SoH

Muchos sistemas de gestión incluyen, además de voltímetros, otros sensores para conocer la corriente y la temperatura de las celdas de las baterías.

Algunas compañías determinan un fin de la vida útil de las baterías, mientras que otras cuentan los ciclos de carga y descarga de las mismas para conocer el estado SoH de la batería. Esto son simples estimaciones de la capacidad de la batería, basados en datos estadísticos, ya que no existe una relación directa entre los ciclos de vida de una batería y su el estado de sus reactivos. (BatteryUniversity, BatteryUniversity, 2018)

En las baterías de ion de litio el método para determinar el estado de salud de la batería se basa en modelos matemáticos complejos, que trabajan con grandes cantidades de datos históricos del funcionamiento de esa batería. Mediante una red neuronal son capaces de estimar el estado de salud del dispositivo, pudiendo gestionar así la carga de la misma.

3. Condensadores y supercondensadores

Para hacer una mención sobre estos dispositivos, se ha utilizado el trabajo realizado por Edgar Cucurella, *Caracterización de los acumuladores con condensadores en comparación con los acumuladores electroquímicos*.

Los condensadores son dispositivos capaces de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. Originalmente no fueron concebidos para este propósito, por ello la capacidad que tienen estos dispositivos es mucho menor a la de las baterías. Sin embargo, existen actualmente unos dispositivos denominados supercondensadores con una capacidad de cargarse y descargarse de forma muy rápida, al igual que los condensadores normales, pero que aumentan su capacidad.

A diferencia de las baterías electroquímicas, los condensadores mantienen los electrones como una carga física, haciéndolos capaces de realizar rápidos flujos de energía. (Fernández Muerza, 2010)

Un condensador está formado por dos láminas de metal conductor separadas por una lámina de material aislante, denominada dieléctrico. Esta construcción mucho más sencilla que la de las baterías, dota a estos dispositivos de una gran robustez y mayor facilidad de construcción. (Cucurella, 2017)

A diferencia de las baterías, en las que la tensión que genera cada celda depende de la construcción y los materiales de la misma; podemos encontrar condensadores que pueden trabajar desde tensión cero hasta altas tensiones. En el caso de los condensadores lo que define la tensión de trabajo es el dieléctrico. (Cucurella, 2017)

Existen tres grandes grupos de condensadores: los electrostáticos, los electrolíticos y los supercondensadores.

3.1 Condensadores electrostáticos

Los condensadores electrostáticos están constituidos por dos electrodos metálicos separados por un material no conductor denominado dieléctrico. El parámetro que define la tensión de trabajo del condensador, que viene determinado por el material del que está hecho el dieléctrico, se conoce como rigidez del material y se mide en voltios por metro.

3.2 Condensadores electrolíticos

Su construcción es similar a los electrostáticos, pero tienen un electrolito conductor en contacto directo con los electrodos de metal. El ejemplo más común de esta tecnología consta de dos electrodos de aluminio separados por papel empapado, que trabaja como electrolito. El dieléctrico corresponde a la capa de óxido de aluminio que se forma en la superficie del metal. Al ser tan fina, las tensiones de trabajo son muy bajas debido a la baja rigidez del dieléctrico, sin embargo consiguen capacidades por unidad de volumen mucho mayores, debido al reducido espesor de sus componentes. (Cucurella, 2017)

3.3 Supercondensadores

Este tipo de condensador también tiene electrolito entre los electrodos. Pero, gracias a la naturaleza porosa de los electrodos y a la pequeña distancia entre ambos, la capacidad por unidad de volumen es mucho mayor que en los dos tipos anteriores.

El tipo más frecuente de supercondensador es el de derivados del carbón, debido a su bajo coste de producción y elevada porosidad, que aumenta la superficie de los electrodos. Un ejemplo serían los de carbonos activados, aerogeles de carbón o nanotubos de carbono.

El principio de funcionamiento de un supercondensador es prácticamente idéntico a los de un condensador normal. Las diferencias radican a nivel interno de cómo se distribuyen las cargas y se neutralizan con los iones del electrolito. Por lo tanto, presentan características comunes con los condensadores, como su robustez, densidad de potencia, etc. pero, acercándose a la densidad energética que pueden proporcionar las baterías.

Gracias a su alta capacidad de absorber energía rápidamente, una de las aplicaciones en las que mejor se adecuan es en los frenos regenerativos. Un condensador de alta capacidad tiene un gran rendimiento (cerca del 98% de la carga se devuelve), almacena mucha energía en relación a su peso, aunque no tanto como una batería; no presentan efecto memoria y tienen una gran capacidad de carga y descarga rápida.

Los supercondensadores aún son demasiado caros y su capacidad demasiado pequeña como para suponer una alternativa económicamente viable a las baterías, pero pueden usarse como elementos de soporte en todas las aplicaciones que requieran de picos de potencia o ciclos cortos de consumo y recarga. (Cucurella, 2017) Y por ahora no tienen una aplicación para los requisitos de este proyecto.

4. Selección del tipo y características del acumulador

La marca del motor eléctrico recomienda utilizar baterías marinas de ciclo profundo de unos 105Ah, a una tensión de 12V, que son baterías de plomo-ácido. Esta recomendación se fundamenta en que las baterías de iones acostumbran a trabajar a una tensión ligeramente superior a los 15V y eso podría causar daños en la máquina a la larga.

A continuación se realizan varias propuestas como fuente de alimentación alternativa para el motor eléctrico.

Aunque en primera instancia se considerará instalar baterías de plomo-ácido, no se descarta la opción de empezar a construir una electrónica para controlar la tensión de la batería de litio para alimentar al motor a los 12V o más que necesita.

4.1 Motor Haswing Outdoor Protruar 1.0

Este motor trabaja a 12V y se ha estimado que consume unos 35A. Con una batería de 12V y 35Ah el motor debería poder trabajar durante 1h, pero la realidad es otra. Una batería, para un mismo nivel de carga, presentará una mayor capacidad en función de la corriente de descarga. Así, cuanto mayor sea la corriente de descarga menor será la capacidad que podrá aportar.

Para reducir la corriente de descarga, se pueden conectar dos baterías en paralelo. Esta configuración reduce la corriente al dividirse entre las dos líneas. Además, da la seguridad de tener dos fuentes de energía independientes, si una falla, se dispone de una segunda.

Dado que se estima una autonomía del grupo de algo más de 1h, para conseguir la autonomía deseada en este proyecto se requeriría instalar una batería que proporcionara una autonomía extra de 30 min.

Un posible modelo sería la Ritar DC12-65 de 70Ah, que tiene una capacidad de 70Ah y un peso de 19,5 kg. Esta batería brindaría una autonomía extra al sistema de 1h 30min. El coste de esta batería es de 125 €. (Autosolar, Batería AGM 12V 70Ah RITAR)

4.2 Motor Haswing Outdoor Osapian 80lb

La ventaja del motor Osapian 80lb es que al alimentarse a una menor corriente (estimada de 25A), las baterías pueden conseguir una mayor capacidad. Sin embargo para la tensión a la que este motor trabaja (24V) se necesitan dos baterías de 12V, incrementando el peso total de la instalación.

En este caso, la propuesta sería montar 2 baterías de pequeña capacidad y 12V. Por ejemplo una solución sería montar 2 baterías Ritar de 33Ah y 12V, proporcionando una autonomía de 1h extra. El precio de ambos componentes ascendería a unos 170€. (Autosolar, Batería AGM 12V 33Ah RITAR)

4.3 Baterías de ion-litio

En comparación, una batería de litio ion, en particular con tecnología de fosfato de litio y hierro, con una capacidad de 100Ah tan solo pesa 14kg, y puede descargarse a 0,5C, es decir a 50A en dos horas, con una eficiencia energética mayor que las de plomo ácido. El coste de una unidad de estas características es de 840€. Este modelo de batería ya incorpora su propio BMS. (All batteries; All batteries)

La carga de esta batería se realiza durante 150 min a una tensión de 15V y 50A.

Haciendo uso de esta tecnología podría disponerse dos baterías de estas características que juntas sumarían un peso de 28 kg y proporcionarían a la embarcación una autonomía de más de cuatro horas.

El principal problema en este caso reside en diseñar una electrónica de control a medida para los distintos ciclos de carga y descarga de las baterías según el funcionamiento de las cargas.

5. Resumen del contenido del Capítulo V

- Por una parte se determina que los condensadores y en particular los supercondensadores no tienen una aplicación para un proyecto de estas características, principalmente debido a la baja capacidad que ofrecen, para la aplicación que se ha enfocado.
- Se tienen algunas consideraciones respecto de las baterías de plomo-ácido y las de litio-ion.
 - Las baterías de iones de litio para una misma capacidad pesan la mitad y tienen un mejor rendimiento.
 - El coste de las baterías de iones es mucho más elevado que las de plomo-ácido.
 - La carga de una batería de plomo ácido acostumbra a ser más lenta que una de semejantes características de litio.
 - Sin embargo las baterías de litio necesitan sistemas para la gestión de la carga y descarga.
 - En las baterías de plomo ácido estos sistemas de gestión acostumbran a ser más simples y precisos.
- Propuesta para el sistema de propulsión basado en el motor Haswing Outdoor Protruar 1.0:
 - 1 batería de gran capacidad (70Ah) como fuente de alimentación complementaria al grupo generador. La batería puede proporcionar 1h 30 min extras de autonomía a la hora de funcionamiento que permite el grupo generador. El precio es de 125€.
- Propuesta para el sistema de propulsión con el motor Haswing Outdoor Osapian 80lb:
 - 2 baterías de poca capacidad (33 Ah) como fuente de alimentación complementaria al grupo electrógeno. Estas baterías brindan 1h extra de autonomía al sistema de propulsión. El coste de ambos componentes es de 170€.

6. Futuras líneas de estudio y desarrollo

Se considera instalar baterías de ion-litio, consiguiendo un mejor peso y mejores prestaciones, aunque con un mayor coste. A partir de la información recogida de los consumos del motor puede realizarse una mejor selección del tipo de batería necesario para alimentar el motor, así como las características de la misma.

Además, conociendo el ciclo de descarga que sigue la batería puede construirse un sistema de gestión más optimizado al tipo de batería utilizado. Este sistema debe desarrollarse para la tecnología que utilice la batería seleccionada, también se permitiría construir un sistema que permitiera el uso de baterías de iones.

Construir una batería por celdas, es una alternativa interesante a comprar una batería ya ensamblada. Esto permite ensamblar la batería a conveniencia del espacio disponible en la embarcación, sin embargo actualmente la mayoría de celdas que se pueden encontrar en venta son de iones de litio.

Capítulo VI. Propuesta final

1. Componentes del sistema propulsivo

Finalmente el sistema propulsivo del prototipo constará de un motor eléctrico Haswing Outdoor Protruar 1.0, un grupo generador constituido por un motor Honda GX25 y un generador eléctrico Mavilor de 600W o 650W de potencia nominal y una batería Ritar DC12-65 de 70Ah.

1.1 El motor eléctrico

El motor eléctrico seleccionado finalmente es el Haswing Outdoor Protruar 1.0.

Dependiendo de si consideramos que la corriente de arranque es 1,5 ó 3 veces mayor que la nominal, tenemos:

$$I_{arr1} = I_{N1} \cdot 1,5$$

$$I_{arr2} = I_{N2} \cdot 3$$

Dado que la corriente de arranque del motor es una únicamente, tenemos:

$$I_{arr1} = I_{arr2} \rightarrow I_{N1} \cdot 1,5 = I_{N2} \cdot 3$$

$$I_{N1} = I_{N2} \cdot 2$$

De aquí se deduce que dependiendo de cuánto más grande se considere la corriente de arranque respecto de la nominal, podemos tener dos corrientes nominales, de las cuales una será 2 veces mayor que la otra. En este caso se considera la mayor corriente nominal de consumo, para sobredimensionar el sistema.

El modelo Protruar 1.0 tiene un pico de intensidad máxima de 50A, que probablemente sean por el arranque del motor. La intensidad nominal del motor es de 1,5 a 3 veces menor que la de arranque.

$$I_N = \frac{I_{arr}}{1,5} = 33,3 A$$

Dividiendo la corriente de arranque entre 1,5 consideramos que la corriente nominal es la más grande posible.

1.2 Grupo electrógeno

El grupo electrógeno seleccionado consta de un motor de gasolina Honda GX25 que es el motor de gasolina más pequeño del mercado. A este motor, se le acopla un generador Mavilor de 600W de potencia nominal, capaz de aportar 50A a 12V.

$$\text{Autonomía (h)} = \frac{\text{Capacidad depósito (L)}}{\text{Consumo (L/h)}} = \frac{0,58}{0,54} = 1,07 \text{ h}$$

El depósito del motor es de 0,58L de capacidad, y el consumo del motor en el punto de máximo rendimiento (cerca de las 7000 rpm) es de 0,54L/h. Es decir que trabajando a 7000 rpm podrá trabajar durante al menos 1h.

1.3 La batería

El modelo DC12-65 de la marca Ritar es un acumulador electroquímico de plomo ácido que utiliza la tecnología AGM, es decir presenta un electrolito en forma de sólido impregnado. La información del modelo más relevante para este proyecto se recoge a continuación.

Para conocer la autonomía que puede brindar al sistema de propulsión deben consultarse las curvas de descarga de la batería, que proporciona la marca.

Según la corriente de descarga y la capacidad de la batería, se obtiene un índice para definir la curva de descarga de la batería. En este caso, ya que el consumo del motor eléctrico será de unos 35A y la capacidad de la batería es de 70 Ah, se obtiene:

$$\frac{35 \text{ A}}{70 \text{ Ah}} = 0,5$$

Es decir una descarga 0,5C. Según las curvas de descarga, para una descarga a corriente 0,35C y estiman una autonomía de algo más de 2 horas. Para una descarga a 0,62C se estima una autonomía de algo más de 1h.

Así, para una corriente de descarga de unos 35A se estima que la batería podrá trabajar durante al menos 1h 30min.

1.3 Cargador de baterías

Para la carga de las baterías se usarán cargadores que permitan los ciclos de carga necesarios para las baterías seleccionadas.

Esta batería puede seguir 3 curvas de carga distinta, con más o menos duración. Las corrientes de carga van desde los 7A hasta los 21A según el ciclo de carga que se siga.

Constant Voltage	$-0.2C \times 2h + 14.4 - 14.7V \times 24h$, Max. Current 0.3C
Constant Current	$-0.2C \times 2h + 0.1C \times 12h$
Fast	$-0.2C \times 2h + 0.3C \times 4h$

Ilustración 31: Ciclos de carga para las baterías ritar. (Autosolar, Batería AGM 12V 70Ah RITAR)

El cargador seleccionado es un cargador inteligente NOCO Genius G26000 para baterías de AGM y ciclo profundo de plomo ácido con capacidad de hasta 500Ah. Puede trabajar a 12 o 24V y 26A de corriente máxima. (Amazon)

2. Coste del sistema propulsivo

Aquí se consideran los costes de la obtención de los distintos dispositivos del sistema de propulsión del prototipo. Además, se contará el coste de los equipos necesarios de medición y algunos componentes extras necesarios.

En el siguiente listado aparece una pequeña descripción de cada componente y el coste aproximado del mismo. Aquellos componentes que se requieran por varias unidades, ya vienen con el coste referenciado al número de unidades a conseguir.

Artículo	Descripción	Coste
Motor eléctrico	Para propulsar la embarcación.	350,00 €
Motor térmico Honda GX25	Motor que da el aporte de energía mecánica al generador eléctrico.	300,00 €
Generador eléctrico	La fuente que genera corriente eléctrica que alimenta el motor eléctrico.	1000,00 €
Batería	Una fuente de alimentación en caso de que el grupo electrógeno falle o para conseguir una mayor autonomía.	125,00 €
Cargador	Para cargar las baterías en tierra.	200,00 €
Conector de trailer	Un dispositivo que permite realizar la conexión del motor a la embarcación de forma segura.	15,00 €
Multímetro	Para medir los consumos instantáneos del sistema.	30,00 €
Luz estribor/babor	Luz unificada estribor-verde babor-rojo.	15,00 €
Remo	Medio de propulsión alternativo en caso de que falle el motor eléctrico.	15,00 €
Interruptor fusible	Desconectar el sistema en caso de que la corriente sea superior a la establecida.	20,00 €

Interruptor ON/OFF	Interruptor para conectar o desconectar una carga	10,00 €
Interruptor "dead man"	Este es un dispositivo que permite abrir el circuito eléctrico, a modo de seguridad.	10,00 €
Diodo	Dar paso a la corriente des de una linea u otra según la tensión en la línea	10,00 €
Marcador tensión corriente	Permite ver el consumo del motor eléctrico en todo momento. Lectura de tensión y de corriente.	10,00 €
Coste final		2.110,00 €

Tabla 11: BoM del sistema propulsivo del prototipo. (Fuente: elaboración propia)

3. Distribución de los componentes

El motor eléctrico de fueraborda, debido a su naturaleza debe ser instalado en el espejo de popa de la embarcación, mediante 2 tuercas que funcionan a modo de sargento y se anclan al perfil del espejo de popa. En esa zona, se requerirá algo más de densidad de material para soportar los esfuerzos transmitidos por la hélice al estar en funcionamiento.

La batería, que tiene un peso aproximado de 20kg, se ha colocado más a proa, por encima del habitáculo del tripulante. El tripulante estará situado en una bañera y su centro de gravedad se encuentra ligeramente desplazado hacia la popa de la embarcación.

La posición del centro de gravedad de cada cuerpo que constituye la embarcación, así como del tripulante, se ha estimado mediante herramientas CAD, a partir de una vista paralela al plano de crujía del modelo.

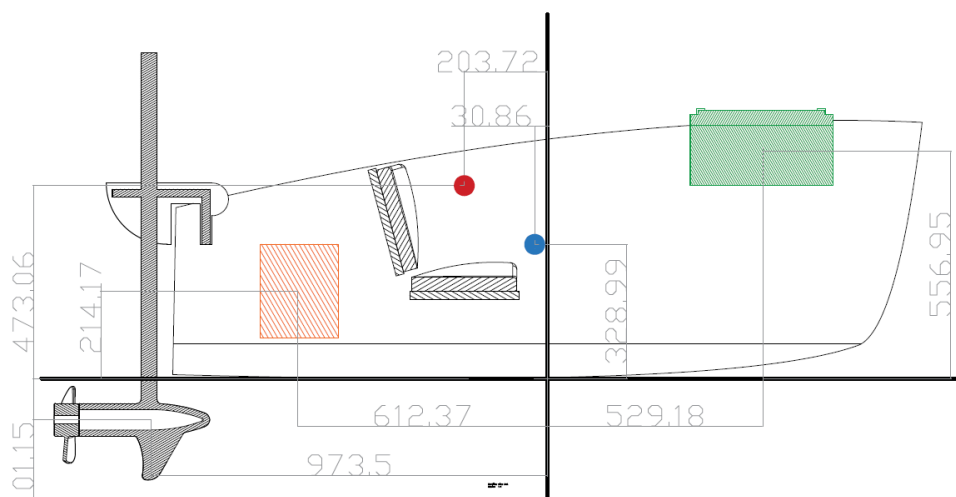


Ilustración 32: Distribución aprox. de pesos en el plano de crujía del modelo. (Fuente: elaboración propia)

En la figura superior puede apreciarse una vista de corte del ensamblaje realizado para simular la distribución de los componentes del sistema propulsivo. Se han acotado las posiciones aproximadas de los centros de gravedad de cada peso que pueda afectar a la estabilidad longitudinal del modelo. Todas las cotas están en milímetros.

El sólido verde corresponde a la batería Ritar AC12-65 de 19,5kg. El sólido naranja corresponde al grupo generador, que tiene un peso de unos 5kg al alza. Las marcas azules y rojas son, respectivamente, el centro de gravedad del casco, con un peso de 40kg y el centro de gravedad del tripulante, que se le dará un peso entre 70 y 90 kg.

El resto de planos de la distribución de los componentes se puede encontrar en los Anexos.

A partir de estos datos se realiza el cálculo de la estabilidad longitudinal del modelo mediante la herramienta Maxsurf Stability. Los datos de entrada son las coordenadas de los centros de gravedad de los pesos de la embarcación. En este caso, están referenciados al plano medio longitudinal del modelo y a la base del mismo.

Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Lightship	1	40,0	40,0			-0,050	0,000	0,350
Persona	1	80,0	80,0			-0,200	0,000	0,350
Bateria	1	19,5	19,5			0,530	0,000	0,550
Grupo electrogeno	1	5,0	5,0			-0,615	0,000	0,200
Motor	1	9,0	9,0			-0,950	0,000	-0,100
Total Loadcase			153,5	0,000	0,000	-0,126	0,000	0,344

Ilustración 33: Coordenadas de centros de gravedad y masas de los pesos del prototipo. (Fuente: elaboración propia)

Esta es una de las entradas de datos para las varias simulaciones realizadas. En este caso particular se consigue un peso total del prototipo de 153,5kg, algo por debajo del desplazamiento definido inicialmente.

En este caso particular, el resultado de la simulación da un trimado de 2,3º apopante, es decir, la perpendicular de popa estará ligeramente más sumergida que la perpendicular de proa.

En las diferentes simulaciones realizadas el trimado oscila entre 1º y 5º máximo en las peores condiciones. Los resultados obtenidos en 3 diferentes cálculos realizados se recogen en los Anexos.

En cuanto al conexionado del sistema, el grupo generador y la batería se conectan en paralelo mediante diodos que darán el paso de corriente de un dispositivo u otro según la tensión. En la salida de las dos fuentes de alimentación se instalan fusibles de 50A para que una alta corriente no pueda dañar el motor.

Cuando la tensión sea muy baja en la batería (porque está descargada, por ejemplo) el motor se alimentará del grupo generador.

Si el grupo generador no está funcionando, el diodo dará paso de corriente des de la batería, alimentando así al motor eléctrico.

Además, que las dos fuentes de alimentación se conecten en paralelo permite que, el pico de corriente del motor eléctrico, correspondiente a su arranque, pueda reducirse al dividirse entre ambas fuentes.

Entre las líneas de alimentación y el motor se instalan 2 dispositivos más. Por una parte el conector de tráiler. Este es un medio eficaz y seguro de realizar la conexión del motor al circuito eléctrico del prototipo.

Por otra parte, se instala un dispositivo conocido como “*dead man’s switch*”. Este dispositivo formado por dos piezas independientes permite abrir el circuito eléctrico (impidiendo el paso de la corriente) en un caso de emergencia. Simplemente debe atarse a la muñeca del tripulante mediante una correa y con un simple estirón abre el circuito eléctrico, parando todo el sistema por seguridad.

Por último, para cargar las baterías se instala un cargador de 220V AC. Entre el cargador y la batería se dispone de un interruptor diferencial.

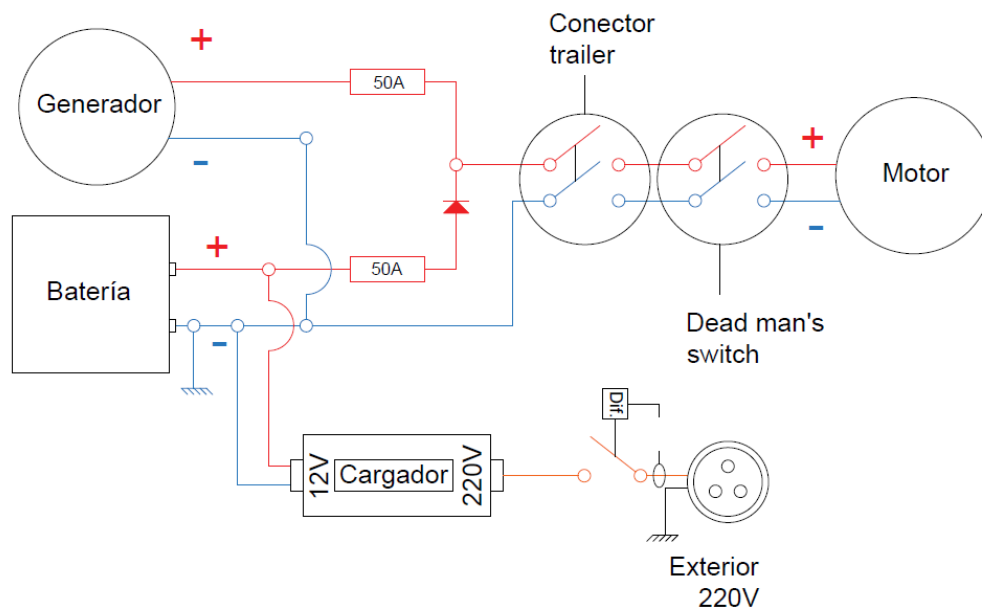


Ilustración 34: Esquema eléctrico del sistema de propulsión del prototipo. (Fuente: elaboración propia)

Capítulo VII. Conclusiones

Conclusiones de la propuesta final

La propuesta del prototipo de minibote y en particular del sistema propulsivo del mismo, han conseguido satisfacer los objetivos iniciales de este proyecto.

Por una parte el coste total ascendería a unos 2.110 € solo para el montaje del sistema de propulsión. En comparación con el primer modelo que se presentaba en este proyecto de la marca *RapidWhale*, el coste final del vehículo asciende significativamente debido al sistema de propulsión diseñado.

Pero con un peso ligeramente inferior, el sistema propulsivo de este proyecto tiene una autonomía muy superior cercana a las dos horas y media. Además, el sistema propulsivo debería ser capaz de empujar el prototipo a una velocidad de unos cuatro nudos y medio.

A falta de ensayos que puedan arrojar más información del comportamiento hidrodinámico del modelo, así como consumos tanto del motor eléctrico como del motor térmico del grupo electrógeno. Sin embargo, para un primer prototipado, el sistema diseñado en este proyecto cumple de sobras con las expectativas.

Conclusiones de los ensayos

Una parte del trabajo de este prototipado es experimentar y realizar pruebas que arrojen información sobre la viabilidad del diseño que se realiza.

En los distintos ensayos realizados al grupo electrógeno “diseñado” por Oriol Gallemí, se ha obtenido cierta información para un dimensionado más correcto de los equipos.

En particular, el grupo de Oriol estaba pensado para cargar baterías que trabajaran a 48V. Por lo tanto, primero no se requiere un aporte de corriente tan alto como podría ser una carga del tipo motor eléctrico; por otro lado, la tensión de trabajo está muy por encima de la requerida aquí.

Para los consumos del motor térmico, en las diferentes condiciones de trabajo a las que se ha expuesto, se han obtenido unos pseudo-rendimientos de la instalación en general que se establece cerca del 10-15% en los casos más optimistas.

Por otra parte los consumos de cada etapa han permitido estimar la autonomía de la que dispondría el grupo electrógeno si el motor térmico solo utilizara el depósito de gasolina que monta de serie. En ninguno de los casos se estima una autonomía menor a 2h.

Esto significa que el grupo puede trabajar con el mismo aporte energético que una batería de plomo ácido como las que se han visto en este proyecto, con un ahorro de peso de más del 75% y una autonomía algo superior.

Conclusiones del proyecto

Los vehículos de características comparables al de este proyecto se basan, principalmente, en las baterías y los motores eléctricos. Sin embargo, en este proyecto se ha conseguido dimensionar un sistema propulsivo híbrido, que consigue un peso menor que un sistema basado puramente en baterías.

Este sistema propulsivo está constituido por un motor eléctrico sin escobillas de 12V que se nutre de dos fuentes de alimentación: una batería de plomo ácido de ciclo profundo y un grupo generador compuesto por un motor de gasolina de 25cc y un generador eléctrico, ambas fuentes de alimentación conectadas en paralelo.

Se ha conseguido una autonomía de más de 2h 30min con una velocidad teórica de 4 nudos o más, y el peso del sistema no supera los 35kg, cumpliendo las especificaciones iniciales del proyecto. La autonomía y el peso pueden reducirse cogiendo una batería de menor capacidad y que consecuentemente rebajaría el precio final del proyecto.

El coste total del sistema propulsivo se estima en los 2110€ considerando los diferentes componentes que se puedan necesitar para construir dicho sistema.

El uso de herramientas CAD abre todo un abanico de oportunidades en el diseño y la proyección de una idea, permitiendo conocer la viabilidad de la misma. La simulación de resistencia al avance corrobora, en cierto grado, la validez del motor seleccionado para conseguir el empuje y la velocidad deseada. En el estudio de estabilidad hecho se obtiene cierta información para tener una primera distribución de los componentes, pero se requieren otras comprobaciones para asegurar un buen comportamiento desde el punto de vista de la estabilidad.

Con este primer sistema de propulsión pueden empezar a realizarse mediciones para conocer los consumos del motor, y que permitan un uso más adecuado de dispositivos tales como acumuladores o grupos electrógenos. Una optimización de las formas del casco según varíe la distribución y la necesidad de disponer de unos espacios o formas determinados para los componentes de la embarcación. Buscar una geometría del casco que sea simple y permita un ensamblaje poco costoso.

Se ha comprobado que actualmente la fuente de energía más utilizada, en aplicaciones de pequeña potencia y mucha autonomía como la de este proyecto, son los acumuladores electroquímicos. En términos de uso, el grupo electrógeno dimensionado en el proyecto puede competir con una batería de iones de litio de 50Ah, y con un 50% de peso menos.

Esa diferencia se nota en que el prototipo de embarcación y el sistema de propulsión dimensionados en este proyecto teóricamente consiguen una autonomía muy superior a cualquiera de los vehículos comparados en el Capítulo I y en concreto con el Mini Boat de *RapidWhale*, con un peso ligeramente superior.

Por otra parte las tecnologías capaces de generar energía limpia todavía se encuentran en las primeras fases de su desarrollo y presenta algunas desventajas que no las hace adecuadas para la aplicación requerida. Así, las placas solares o las celdas de combustible todavía no tienen una aplicación en proyectos de estas características, pero sin embargo tienen un futuro prometedor como fuentes de energía limpia y respetuosa con el medio ambiente.

Bibliografía

- Alibaba.com. (s.f.). *Alibaba.com*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/2017-new-design-environmental-pem-fuel-cell-200w-for-uav-drone-60717369787.html?spm=a2700.8699010.normalList.41.8ad4daf8by1OTM>
- All batteries. (s.f.). *Batería Litio Hierro Fosfato para 12V 100 Ah*. Obtenido de <http://www.all-batteries.es/bateria-litio-hierro-fosfato/12v/100ah.html>
- Almarza, J. (2010). *Diseño y Fabricación de una Pila de Combustible de Hidrógeno de Baja Potencia*. Terrassa.
- Amazon. (s.f.). *Cargador inteligente NOCO Genius G26000*. Obtenido de (https://www.amazon.com/gp/product/B004LX14Z2/ref=as_li_tl?ie=UTF8&tag=rapidwhale-20&camp=1789&creative=9325&linkCode=as2&creativeASIN=B004LWVEKS&linkId=1aa345f7d6ededd1c39be27b44d028ba&th=1)
- Aprendiendo arduino. (s.f.). *Motores dc*. Obtenido de <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/motor-dc/>
- Autosolar. (s.f.). *Batería AGM 12V 33Ah RITAR*. Obtenido de <https://autosolar.es/baterias-agm-12v/bateria-agm-33ah-12v-ritar>
- Autosolar. (s.f.). *Batería AGM 12V 40Ah Ritar*. Obtenido de <https://autosolar.es/baterias-agm-12v/bateria-agm-40ah-12v-ritar>
- Autosolar. (s.f.). *Batería AGM 12V 70Ah RITAR*. Obtenido de <https://autosolar.es/baterias-agm-12v/bateria-agm-12v-70ah-ritar>
- Autosolar.com. (s.f.). *Batería AGM 12V 115Ah Ultracell UC115-12*. Obtenido de <https://autosolar.es/baterias-agm-12v/bateria-agm-12v-115ah-ultracell-uc-115-12>
- BatteryUniversity. (2017). *BatteryUniversity*. Obtenido de How to measure State-of-Charge: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/how_to_measure_state_of_charge
- BatteryUniversity. (2018). *BatteryUniversity*. Obtenido de Battery Management System (BMS): https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_monitor_a_battery
- Boix, Oriol; Sainz, Luis; Córcoles, Felipe; Suelves, Francisco J. (2009). Baterías. En *Tecnología Eléctrica* (pág. 249). Barcelona: Cano Pina, SL Ediciones Ceysa.

Boix, Oriol; Sainz, Luis; Córcoles, Felipe; Suelves, Francisco J. (2009). Máquina de corriente continua. En *Tecnología eléctrica* (págs. 135-136). Barcelona: Cano Pina, SL Ediciones Ceysa .

Cucurella, E. (2017). *Caracterización de los acumuladores con condensadores en comparación con los acumuladores electroquímicos*. Barcelona.

DAMEN MARINE COMPONENTS. (s.f.). *AMEN MARINE COMPONENTS*. Obtenido de Van der Velden present at SMM - HALL A4 propulsion Systems: <https://www.damenmc.com/en/news/2012/van-der-velden-marine-systems-present-at-smm-hall-a4-propulsion-systems>

Dexen.com. (s.f.). *Tipos de celdas solares*. Obtenido de <https://www.dexen.mx/celdas-solares/>

Fernández Muerza, A. (2010). *Fundación Eroski Consumer*. Obtenido de Acumuladores, las baterías del futuro: http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2010/10/27/196744.php

Haswing Outdoor. (s.f.). *Haswing Outdoor*, . Recuperado el 2019, de Protruar 1.0 & 2.0: <https://haswingoutdoor.com/trolling-motors/protruar-1-0-2-0.html>

Heras Zurita, R. (2013). *El Sistema Propulsivo del Barco: las Hélices Marinas y el Fenómeno de la Cavitación*. Barcelona.

Honda. (s.f.). *Honda motores mini GX25*,. Obtenido de <http://www.honda-engines-eu.com/es/web/eec-public-site/engine-model-details?e=3>

Laimer, C. (s.f.). *Instructables*. Obtenido de 600 Watt, 3d-printed, Halbach Array, Brushless DC Electric Motor: <https://www.instructables.com/id/600-Watt-3d-printed-Halbach-Array-Brushless-DC-Ele/>

LiftFoil. (s.f.). *Lift Foils*. Obtenido de Lift eFoil: <https://store.liftfoils.com/products/efoil?variant=38442287940>

Mavilor. (s.f.). *Mavilor Generators*, . Obtenido de <http://mavilor.es/>

Modelboats.co.uk. (s.f.). *Rim drive thruster*. Obtenido de <https://www.modelboats.co.uk/forums/postings.asp?th=73091>

My SeaScooter Underwater Propulsion. (s.f.). *My SeaScooter Underwater Propulsion*. Obtenido de <https://www.myseascooter.com/producto/yamaha-seascooter-500li/>

Nauticajonkepa.wordpress. (s.f.). *La hélice*. Obtenido de <https://nauticajonkepa.wordpress.com/2013/06/10/la-helice/>

Nauticexpo.com. (s.f.). *Hélices*. Obtenido de <http://www.nauticexpo.es/prod/schottel/product-22142-78103.html>

RapidWhale, Josh Tulberg. (s.f.). *Rapid Whale Mini Boat*. Obtenido de <http://rapidwhale.com/mini-boat.php>

RS Online. (s.f.). *Batería RS PRO 12V 55Ah*. Obtenido de <https://es.rs-online.com/web/p/baterias-recargables-de-plomo-acido/7270408/>

SEABOB Adventure. (s.f.). *SEABOB Adventure*. Obtenido de <http://www.seabobadventure.com/es/especificaciones-seabob/>

Voith. (s.f.). *Voith Inline Thrusters & Voith Inline Propulsor*. Obtenido de <https://voith.com/corp-en/drives-transmissions/voith-inline-thruster-propulsor.html>

Yamaha-motor. (s.f.). *Motor eléctrico fuera borda m20*. Obtenido de <https://www.yamaha-motor.eu/gb/en/products/marine-engines/portables/m-20/techspecs/>

A1. Anexo 1

A1.1 Resultados obtenidos en el ensayo realizado por Oriol Gallemí del grupo electrógeno

[illegible]

Tabla A 1: Resultados obtenidos en los ensayos al grupo electrógeno de Oriol Gallemí. (Fuente: Uniersidad Politécnica de Catalunya)

A1.2 Resultados obtenidos en el Ensayo 2

Etapas	Cargas conectadas	Horas (hh:mm)	Tensión (V)	Corriente (A)	Combustible a inicio etapa (ml)	Combustible a final etapa (ml)	Consumo probeta (ml)	Lectura probeta (mm)	Consumo tubo (ml)	Consumo etapa (ml)	Potencia entrada (W)	Potencia salida (W)	Rendimiento Etapa (%)
Etapas 2.1	Carga 1	18:29	42	2	20	15,5	4,5	22,5	0,11	4,61	2674,1	84	3,1
Etapas 2.2	Cargas 1 y 2	18:30	38	3,9	15,5	12,5	3	15	0,07	3,07	1782,7	148,2	8,3
Etapas 2.3	Cargas 1 a 3	18:31	34	4,7	12,5	10,5	2	10	0,05	2,05	1188,5	159,8	13,4
Etapas 2.4	Cargas 1 a 4	18:32	30	6,4	10,5	7	3,5	17,5	0,09	3,59	2079,8	192	9,2

Tabla A 2: Resultados obtenidos en el Ensayo 2. (Fuente: elaboración propia)

A1.3 Resultados obtenidos en el Ensayo 3

Etapas	Cargas conectadas	Horas (hh:mm)	Tensión (V)	Corriente (A)	Combustible a inicio etapa (ml)	Combustible a final etapa (ml)	Consumo probeta (ml)	Lectura probeta (mm)	Consumo tubo (ml)	Consumo etapa (ml)	Potencia entrada (W)	Potencia salida (W)	Rendimiento (%)
Etapas 3.1	Cargas 1 a 4	18:39	28	6,3	20	17,5	2,5	12,5	0,06	2,56	1485,6	176,4	11,9
Etapas 3.2	Cargas 1 a 5	18:40	26	8	17,5	15	2,5	12,5	0,06	2,56	1485,6	208	14,0
Etapas 3.3	Cargas 1 a 6	18:41	24	9	15	12,5	2,5	12,5	0,06	2,56	1485,6	216	14,5

Tabla A 3: Resultados obtenidos en el Ensayo 3. (Fuente: elaboración propia)

A1.4 Resultados obtenidos en el Ensayo 4

Etapas	Cargas conectadas	Horas (hh:mm)	Tensión (V)	Corriente (A)	Combustible a inicio etapa (ml)	Combustible a final etapa (ml)	Consumo probeta (ml)	Lectura probeta (mm)	Consumo tubo (ml)	Consumo etapa (ml)	Potencia entrada (W)	Potencia salida (W)	Rendimiento (%)
Etapas 4.1	Carga 1	18:53	48	2,2	25	21,5	3,5	17,5	0,09	3,59	2079,8	105,6	5,1
Etapas 4.2	Cargas 1 y 2	18:54	48	4,4	21,5	17	4,5	22,5	0,11	4,61	2674,1	211,2	7,9
Etapas 4.3	Cargas 1 a 3	18:55	48	6,7	17	12	5	25	0,12	5,12	2971,2	321,6	10,8
Etapas 4.4	Cargas 1 a 4	18:56	48	8,6	12	7	5	25	0,12	5,12	2971,2	412,8	13,9
Etapas 4.5	Cargas 1 a 5	18:57	40	10	7	2	5	25	0,12	5,12	2971,2	400	13,5

Tabla A 4: Resultados obtenidos en el Ensayo 4. (Fuente: elaboración propia)

A2. Anexo 2

A2.1 Dimensiones y coeficientes que definen el modelo utilizado en las simulaciones.

Simple yacht

Proportional Scaling

☐ 1.874 m Length

☐ 0.853 m Beam

☐ 0.603 m Depth

☐ re-scale markers

☐ re-scale curves

OK Cancel

Ilustración A 1: Dimensiones básicas del modelo utilizado en el proyecto. (Fuente: elaboración propia)

Frame of Reference and Zero point

Longitudinal Datum

☐ Aft Perp. -0.893 m Set to DWL

☒ Midships 0 m

☐ Fwd Perp. 0.893 m Set to DWL

☐ Other -0.907 m Aft extent Fwd extent

Label MS ☒ Default

Vertical Datum

☐ DWL 0.25 m

☒ Baseline 0 m Find Base

☐ Other 0.267 m

Label Baseline ☒ Default

OK Cancel

Ilustración A 2: Ejes y planos de referencia de las simulaciones en MaxSurf. (Fuente: elaboración propia)

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	171,7	kg
2	Volume (displaced)	0,172	m ³
3	Draft Amidships	0,250	m
4	Immersed depth	0,250	m
5	WL Length	1,786	m
6	Beam max extents on WL	0,720	m
7	Wetted Area	1,436	m ²
8	Max sect. area	0,127	m ²
9	Waterpl. Area	1,038	m ²
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,757	
11	Block coeff. (Cb)	0,535	
12	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,733	
13	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,808	
14	LCB length	-0,082	from z
15	LCF length	-0,101	from z
16	LCB %	-4,611	from z
17	LCF %	-5,639	from z
18	KB	0,155	m
19	KG fluid	0,000	m
20	BMT	0,208	m
21	BML	1,237	m
22	GMt corrected	0,362	m
23	GML	1,391	m
24	KMt	0,362	m
25	KML	1,391	m
26	Immersion (TPc)	0,010	tonne/
27	MTc	0,001	tonne.
28	RM at 1deg = GMt.Disp.si	1,086	kg.m
29	Length:Beam ratio	2,482	
30	Beam:Draft ratio	2,879	
31	Length:Vol ^{0.333} ratio	3,213	
32	Precision	Highest	211 st

Ilustración A 3: Coeficientes hidrostáticos, dimensiones, desplazamientos y otros datos del modelo. (Fuente: elaboración propia)

A2.2 Datos de entrada y resultados de la simulación en Maxsurf

Resistance.

Item	Value	Units	Savitsky Pre-planin g	Savitsky Planing	Blount and Fox Planing	Lanthieru	Holtrop	Van Oortmerssen	Series60	Deft I,II Sail	Deft III Sail	Compton	Fung	Slender body	Wyman	KR Barge
1	LWL	1,786 m	1,786	1,786	1,786	1,786 (low)	1,786 (lo)	1,786 (low)	1,786 (high)	1,786 (low)	1,786 (lo)	1,786 (low)	1,786	-	1,786	-
2	Beam	0,72 m	0,72	0,72	0,72	0,72 (high)	0,72 (high)	0,72 (high)	0,72 (high)	0,72 (high)	0,72 (high)	0,72 (high)	0,72 (high)	-	-	-
3	Draft	0,25 m	-	-	-	0,25	0,25	0,25 (high)	0,25 (high)	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	-
4	Displaced volume	0,172 m³	0,172	0,172	0,172	0,172 (high)	0,172	0,172	0,172 (low)	0,172 (high)	0,172 (high)	0,172 (high)	0,172	-	0,172	-
5	Wetted area	1,41 m²	1,41	-	-	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
6	Prismatic coeff. (Cp)	0,757	-	-	-	-	0,757	0,757 (high)	-	0,757 (high)	0,757 (hi)	-	0,757	-	-	-
7	Waterplan area coeff. (C)	0,808	-	-	-	-	0,808	-	-	0,808	0,808	-	-	-	-	-
8	1/2 angle of entrance	36,1 deg.	36,1	-	-	-	36,1	36,1	-	-	-	-	36,1 (high)	-	-	-
9	LCG from midships (+ve)	-0,082 m	-	-0,082	-0,082	-	-0,082	-0,082	-	-0,082	-0,082	-0,082	-	-	-	-
10	Transom area	0 m²	0	-	-	0 (low)	0	-	-	-	-	-	0	-	-	-
11	Transom w/ beam	0 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-
12	Transom draft	0,18 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,18	-	-	-
13	Max sectional area	0,127 m²	0,127	-	-	0,127 (high)	-	0,127 (low)	-	-	-	-	0,127	-	-	0,127
14	Bulb transverse area	0 m²	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	0	-	-	-
15	Bulb height from keel	0 m	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	Draft at FP	0,25 m	-	-	-	-	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	Deadrise at 50% LWL	18,8 deg.	-	18,8	18,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	Hard chine or Round bil	Round bilge	-	-	-	Round bilge	-	-	-	-	-	Round bilge	-	-	-	-
19																
20	Frontal Area	0 m²														
21	Headwind	0 kn														
22	Drag Coefficient	0														
23	Air density	0,001 tonne/m³														
24	Appendage Area	0 m²														
25	Normal App. length	0 m														
26	Appendage Factor	1														
27																
28	Correlation allow.	use 19th IT		Varies with	Varies with speed	use 19th ITTC	Calculate	use 19th ITTC formula	use 19th IT			use 19th ITT	Fixed	use 19th ITTC for		
29	Kinematic viscosity	0,0000011 m²/s														
30	Water Density	1,026 tonne/m³														

Ilustración A 4: Parámetros del modelo y rangos considerados en los distintos modelos para estimar la resistencia al avance. (Fuente:elaboración propia)

Speed (km)	Fronda No. LMI	Fronda No. Vol.	Savitsky Pre-plan Resist.	Savitsky Pre-plan Power (W)	Savitsky Planning Resist (W)	Savitsky Planning Power (W)	Bount and Fox Planning Resist (N)	Bount and Fox Planning Power (W)	Lahtharu Resist (N)	Lahtharu Power (W)	Hollop Resist (N)	Hollop Power (W)	Van Ommersen Resist (N)	Van Ommersen Power (W)	Series60 Resist (N)	Series60 Power (W)	Sail Resist (N)	Sail Power (W)	Deit II Resist (N)	Deit II Power (W)	Deit III Resist (N)	Deit III Power (W)	Compton Resist (N)	Compton Power (W)	Fung Resist (N)	Fung Power (W)	Slender body Resist (N)	Slender body Power (W)	Wyman Resist (N)	Wyman Power (W)	KR Range Resist (N)	KR Range Power (W)
1	0.000	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.250	0.031	0.055	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0.500	0.081	0.110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0.750	0.092	0.166	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	1.000	0.123	0.220	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1.250	0.154	0.275	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1.500	0.184	0.330	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1.750	0.215	0.388	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	2.000	0.246	0.441	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	2.250	0.277	0.498	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	2.500	0.307	0.551	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	2.750	0.338	0.606	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	3.000	0.369	0.661	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	3.250	0.400	0.716	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	3.500	0.430	0.771	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	3.750	0.461	0.826	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	4.000	0.492	0.881	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	4.250	0.522	0.936	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	4.500	0.553	0.991	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	4.750	0.584	1.047	281.38	638.71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	5.000	0.615	1.102	328.83	845.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	5.250	0.646	1.157	368.77	988.88	350.64	947.03	322.75	871.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	5.500	0.676	1.212	405.36	1146.93	362.33	1025.21	359.17	1016.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	5.750	0.707	1.267	421.26	1246.09	373.61	1104.87	380.27	1054.46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	6.000	0.738	1.322	437.22	1331.04	383.88	1184.50	406.33	1205.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	6.250	0.768	1.377	452.28	1398.83	393.16	1264.11	427.88	1268.55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	6.500	0.799	1.432	413.96	1384.23	401.12	1341.32	454.27	1619.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	6.750	0.830	1.487	381.88	1328.09	407.62	1416.48	468.67	1620.53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	7.000	0.860	1.542	380.82	1370.28	412.69	1468.77	475.15	1711.07	175.62	632.44	271.07	978.17	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21	238.21
30	7.250	0.891	1.597	388.43	1448.74	416.02	1561.63	480.11	1780.07	190.80	711.64	284.00	1059.2	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72	268.72
31	7.500	0.922	1.652	380.11	1468.88	417.99	1612.78	482.00	1859.72	208.20	809.31	291.48	1141.7	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21	274.21
32	7.750	0.953	1.708	371.75	1482.14	418.64	1669.10	481.30	1918.92	228.00	969.03	311.53	1240.0	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69	280.69
33	8.000	0.983	1.763	388.08	1514.77	418.11	1720.77	481.30	1989.17	250.39	1030.51	326.15	1342.2	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21	306.21
34	8.250	1.014	1.818	383.81	1543.21	416.88	1788.02	473.94	2011.48	275.57	1169.57	341.32	1448.8	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44	320.44
35	8.500	1.045	1.873	357.82	1583.33	414.20	1811.20	468.10	2048.82	303.75	1338.21	361.03	1561.2	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64	334.64
36	8.750	1.076	1.928	355.23	1599.02	411.14	1868.99	461.31	2076.82	338.13	1508.56	373.25	1681.1	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87	340.87
37	9.000	1.106	1.983	368.65	1651.28	407.54	1888.92	453.94	2102.07	368.95	1712.65	389.54	1804.4	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02
38	9.250	1.137	2.038	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	9.500	1.168	2.089	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	9.750	1.199	2.148	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	10.000	1.229	2.203	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Ilustración A 5: Resistencias al avance y potencia necesaria para distintas velocidades del modelo. (Fuente: elaboración propia)

A2.3 Datos de entrada y resultados de las simulaciones en Maxsurf

Stability

A2.3.1 Determinar posición del centro de gravedad del modelo

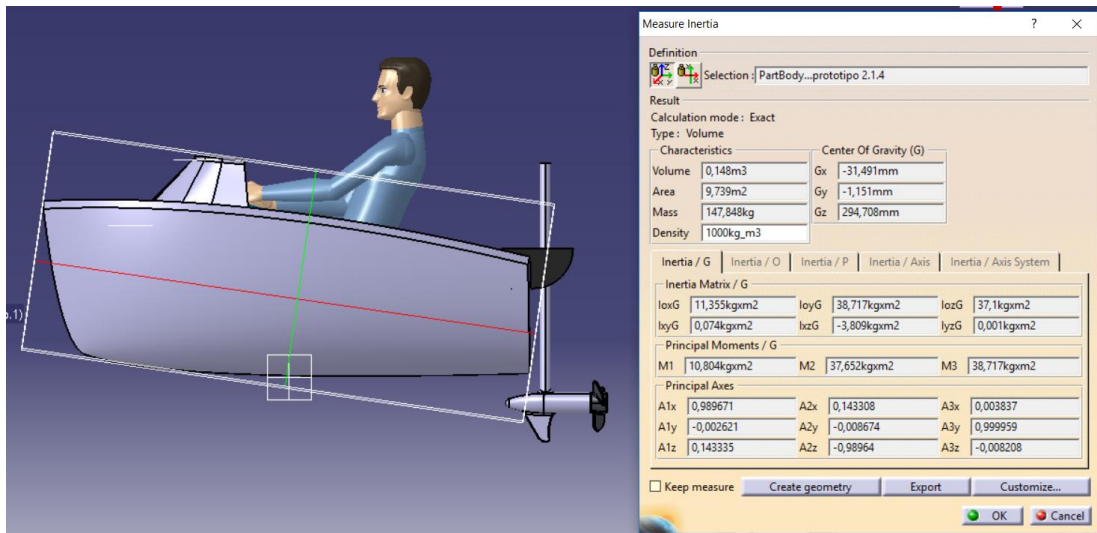


Ilustración A 6: Estimación centro de gravedad del modelo mediante software CAD. (Fuente: elaboración propia)

A2.3.2 Caso 1. Desplazamiento total 153,5kg.

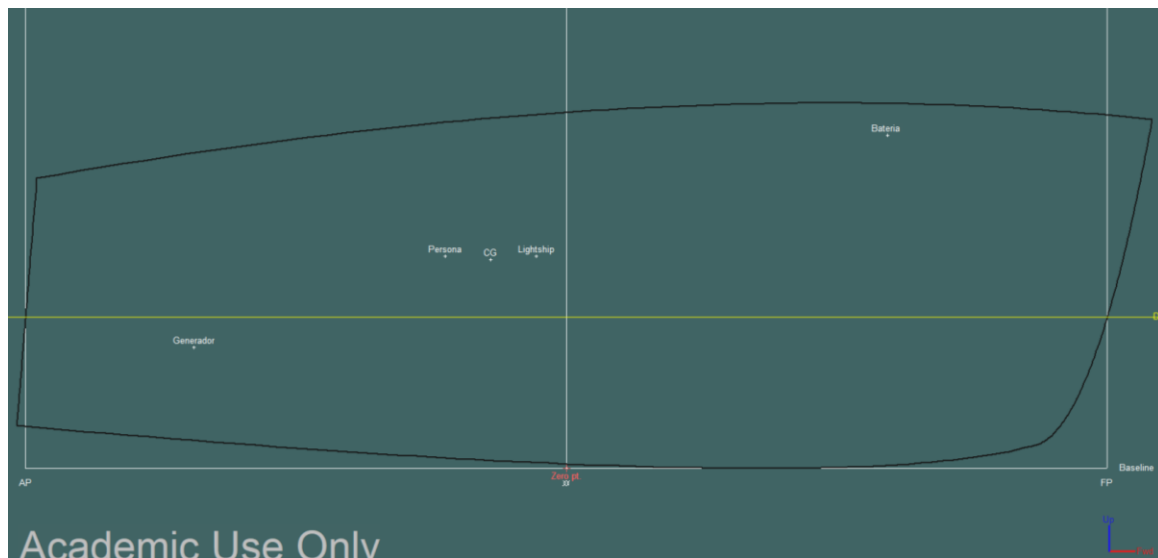


Ilustración A 7: Posición de los pesos en el modelo para el estudio de estabilidad longitudinal para el caso 1. (Fuente: elaboración propia)

	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Unit Volume m^3	Total Volume m^3	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
1	Lightship	1	40,0	40,0			-0,050	0,000	0,350
2	Persona	1	80,0	80,0			-0,200	0,000	0,350
3	Bateria	1	19,5	19,5			0,530	0,000	0,550
4	Generador	1	5,0	5,0			-0,615	0,000	0,200
5	Motor	1	9,0	9,0			-0,950	0,000	-0,100
6	Total Loadcase			153,5	0,000	0,000	-0,126	0,000	0,344

Ilustración A 8: Posición de los pesos en el modelo para el estudio de estabilidad longitudinal para el caso 1. (Fuente: elaboración propia)

	Heel to Starboard deg	-30,0	-25,0	-20,0	-15,0	-10,0	-5,0	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
1	GZ m	-0,016	-0,012	-0,008	-0,006	-0,004	-0,002	0,000	0,002	0,004	0,006	0,008	0,012	0,016
2	Area under GZ curv	0,1921	0,1239	0,0746	0,0399	0,0171	0,0042	0,0000	0,0042	0,0171	0,0399	0,0746	0,1239	0,1921
3	Displacement kg	153,5	153,5	153,5	153,5	153,5	153,5	153,5	153,5	153,5	153,5	153,5	153,5	153,5
4	Draft at FP m	0,171	0,177	0,181	0,184	0,187	0,188	0,188	0,188	0,187	0,184	0,181	0,177	0,171
5	Draft at AP m	0,231	0,241	0,249	0,254	0,257	0,259	0,260	0,259	0,257	0,254	0,248	0,241	0,231
6	WL Length m	1,771	1,772	1,772	1,771	1,770	1,769	1,767	1,769	1,770	1,771	1,772	1,772	1,771
7	Beam max extents	0,734	0,724	0,715	0,709	0,704	0,702	0,701	0,702	0,704	0,709	0,715	0,724	0,734
8	Wetted Area m^2	1,335	1,328	1,323	1,320	1,317	1,316	1,316	1,316	1,317	1,320	1,323	1,328	1,335
9	Waterpl. Area m^2	1,057	1,040	1,026	1,016	1,008	1,004	1,002	1,004	1,008	1,016	1,026	1,040	1,057
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,748	0,754	0,759	0,763	0,766	0,768	0,769	0,768	0,766	0,763	0,759	0,754	0,747
11	Block coeff. (Cb)	0,515	0,525	0,535	0,545	0,552	0,558	0,559	0,558	0,552	0,545	0,535	0,525	0,515
12	LCB from zero pt. (	-0,132	-0,132	-0,133	-0,133	-0,133	-0,134	-0,134	-0,134	-0,133	-0,133	-0,133	-0,132	-0,132
13	LCF from zero pt. (	-0,109	-0,111	-0,114	-0,115	-0,116	-0,117	-0,117	-0,117	-0,116	-0,115	-0,114	-0,111	-0,109
14	Max deck inclinatio	30,042	25,065	20,098	15,149	10,243	5,4952	2,2993	5,4952	10,243	15,149	20,098	25,065	30,042
15	Trim angle (+ve by	1,9320	2,0605	2,1549	2,2219	2,2658	2,2913	2,2993	2,2913	2,2658	2,2218	2,1549	2,0603	1,9306

Ilustración A 9: Resultados del cálculo de la estabilidad longitudinal del prototipo para el caso 1. (Fuente: elaboración propia)

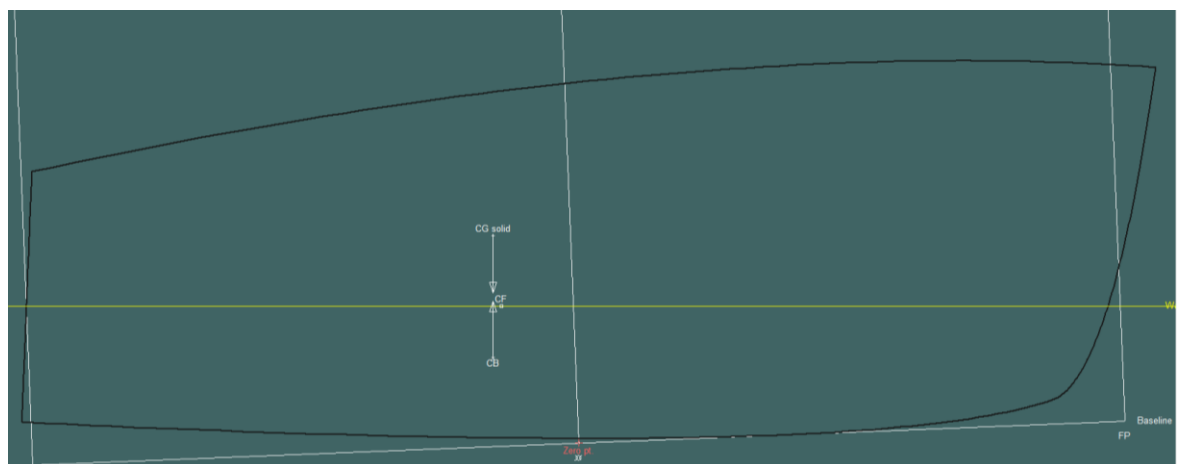


Ilustración A 10: Trimado final obtenido en Maxsurf Stability para el caso 1. (Fuente: elaboración propia)

A2.3.3 Caso 2. Desplazamiento total 173,5kg.

	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Unit Volume m^3	Total Volume m^3	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
1	Lightship	1	40,0	40,0			-0,050	0,000	0,350
2	Persona	1	100,0	100,0			-0,200	0,000	0,350
3	Bateria	1	19,5	19,5			0,530	0,000	0,550
4	Generador	1	5,0	5,0			-0,615	0,000	0,200
5	Motor	1	9,0	9,0			-0,950	0,000	-0,100
6	Total Loadcase			173,5	0,000	0,000	-0,134	0,000	0,345

Ilustración A 11: Posición de los pesos en el modelo para el estudio de estabilidad longitudinal para el caso 2. (Fuente: elaboración propia)

	Heel to Starboard deg	-30,0	-25,0	-20,0	-15,0	-10,0	-5,0	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
1	GZ m	-0,017	-0,013	-0,009	-0,006	-0,004	-0,002	0,000	0,002	0,004	0,006	0,009	0,013	0,017
2	Area under GZ curv	0,2078	0,1342	0,0808	0,0433	0,0185	0,0045	0,0000	0,0045	0,0185	0,0433	0,0808	0,1342	0,2078
3	Displacement kg	173,5	173,5	173,5	173,5	173,5	173,5	173,5	173,5	173,5	173,5	173,5	173,5	173,5
4	Draft at FP m	0,180	0,186	0,191	0,194	0,196	0,197	0,197	0,197	0,196	0,194	0,191	0,186	0,180
5	Draft at AP m	0,261	0,270	0,277	0,281	0,284	0,286	0,287	0,286	0,284	0,281	0,277	0,270	0,261
6	WL Length m	1,773	1,774	1,774	1,773	1,772	1,771	1,769	1,771	1,772	1,773	1,774	1,774	1,773
7	Beam max extents	0,757	0,745	0,736	0,728	0,723	0,720	0,719	0,720	0,723	0,728	0,736	0,745	0,757
8	Wetted Area m^2	1,407	1,400	1,395	1,391	1,389	1,387	1,387	1,387	1,389	1,391	1,395	1,400	1,407
9	Waterpl. Area m^2	1,091	1,072	1,057	1,045	1,036	1,031	1,029	1,031	1,036	1,045	1,057	1,072	1,091
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,753	0,758	0,762	0,765	0,768	0,770	0,771	0,770	0,768	0,765	0,762	0,758	0,753
11	Block coeff. (Cb)	0,521	0,532	0,542	0,551	0,560	0,565	0,567	0,565	0,560	0,551	0,542	0,532	0,521
12	LCB from zero pt. (	-0,142	-0,142	-0,143	-0,143	-0,144	-0,144	-0,144	-0,144	-0,144	-0,143	-0,143	-0,142	-0,142
13	LCF from zero pt. (	-0,110	-0,112	-0,114	-0,116	-0,117	-0,117	-0,117	-0,117	-0,117	-0,116	-0,114	-0,112	-0,110
14	Max deck inclinatio	30,076	25,111	20,160	15,237	10,380	5,7532	2,8672	5,7532	10,380	15,237	20,160	25,110	30,076
15	Trim angle (+ve by	2,5917	2,6894	2,7598	2,8090	2,8420	2,8604	2,8672	2,8604	2,8420	2,8090	2,7596	2,6891	2,5916

Ilustración A 12: Resultados del cálculo de la estabilidad longitudinal del prototipo para el caso 2. (Fuente: elaboración propia)

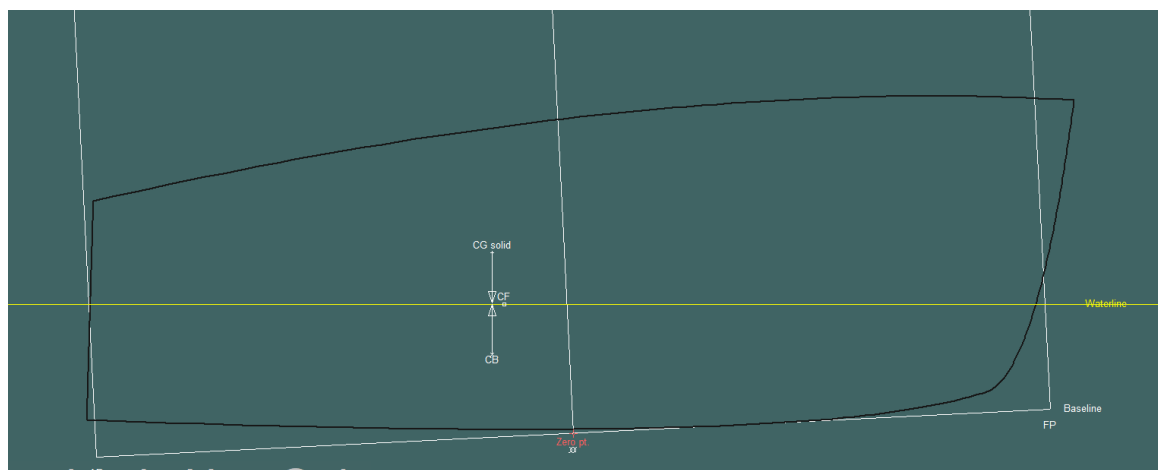


Ilustración A 13: Trimado final obtenido en Maxsurf Stability para el caso 2. (Fuente: elaboración propia)

A2.3.4 Caso 3. Desplazamiento total 163,5kg.

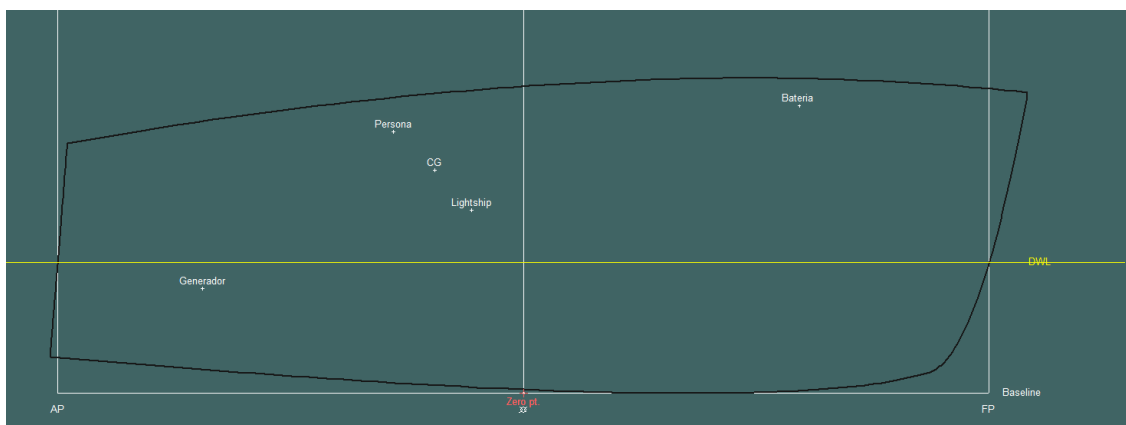


Ilustración A 14: Posición de los pesos en el modelo para el estudio de estabilidad longitudinal para el caso 3. (Fuente: elaboración propia)

	Item Name	Quantity	Unit Mass kg	Total Mass kg	Unit Volume m^3	Total Volume m^3	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
1	Lightship	1	40,0	40,0			-0,100	0,000	0,350
2	Persona	1	90,0	90,0			-0,250	0,000	0,500
3	Bateria	1	19,5	19,5			0,530	0,000	0,550
4	Generador	1	5,0	5,0			-0,615	0,000	0,200
5	Motor	1	9,0	9,0			-0,950	0,000	-0,100
6	Total Loadcase			163,5	0,000	0,000	-0,170	0,000	0,427

Ilustración A 15: Posición de los pesos en el modelo para el estudio de estabilidad longitudinal para el caso 3. (Fuente: elaboración propia)

	Heel to Starboard deg	-30,0	-25,0	-20,0	-15,0	-10,0	-5,0	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
1	GZ m	0,023	0,021	0,018	0,014	0,010	0,005	0,000	-0,005	-0,010	-0,014	-0,018	-0,021	-0,023
2	Area under GZ curv	-0,401	-0,291	-0,193	-0,111	-0,050	-0,012	0,0000	-0,012	-0,050	-0,111	-0,193	-0,291	-0,401
3	Displacement kg	163,5	163,5	163,5	163,5	163,5	163,5	163,5	163,5	163,5	163,5	163,5	163,5	163,5
4	Draft at FP m	0,130	0,136	0,141	0,144	0,146	0,147	0,148	0,147	0,146	0,144	0,141	0,136	0,130
5	Draft at AP m	0,282	0,291	0,297	0,302	0,305	0,307	0,307	0,307	0,305	0,302	0,297	0,291	0,282
6	WL Length m	1,756	1,758	1,758	1,758	1,757	1,756	1,754	1,756	1,757	1,758	1,758	1,758	1,756
7	Beam max extents	0,748	0,737	0,729	0,722	0,717	0,714	0,713	0,714	0,717	0,722	0,729	0,737	0,748
8	Wetted Area m^2	1,354	1,347	1,342	1,338	1,335	1,334	1,334	1,334	1,335	1,338	1,342	1,347	1,354
9	Waterpl. Area m^2	1,066	1,048	1,034	1,023	1,015	1,010	1,009	1,010	1,015	1,023	1,034	1,048	1,066
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,740	0,743	0,745	0,746	0,747	0,748	0,749	0,748	0,747	0,746	0,745	0,743	0,740
11	Block coeff. (Cb)	0,510	0,517	0,523	0,529	0,533	0,536	0,537	0,536	0,533	0,529	0,523	0,517	0,510
12	LCB from zero pt. (	-0,190	-0,191	-0,192	-0,193	-0,194	-0,194	-0,194	-0,194	-0,194	-0,193	-0,192	-0,191	-0,190
13	LCF from zero pt. (	-0,128	-0,129	-0,131	-0,132	-0,133	-0,133	-0,133	-0,133	-0,133	-0,132	-0,131	-0,129	-0,128
14	Max deck inclinatio	30,267	25,373	20,524	15,756	11,171	7,1246	5,1056	7,1246	11,171	15,756	20,523	25,373	30,267
15	Trim angle (+ve by	4,8645	4,9456	5,0065	5,0516	5,0825	5,1013	5,1056	5,1012	5,0824	5,0512	5,0057	4,9443	4,8639

Ilustración A 16: Resultados del cálculo de la estabilidad longitudinal del prototipo para el caso 3. (Fuente: elaboración propia)

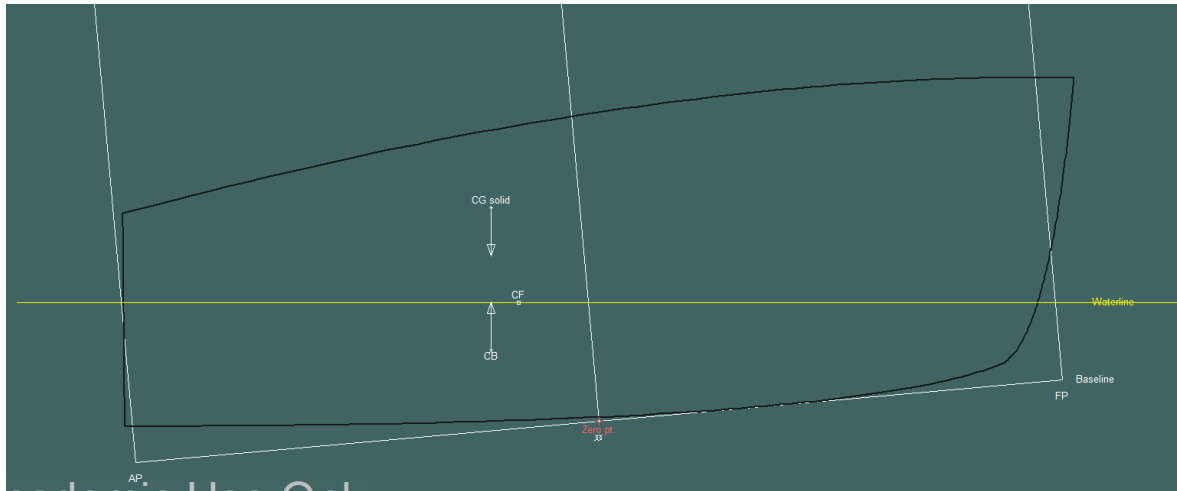


Ilustración A 17: Trimado final obtenido en Maxsurf Stability para el caso 3. (Fuente: elaboración propia)

A2.4 Croquis de la distribución de los componentes en el prototipo.

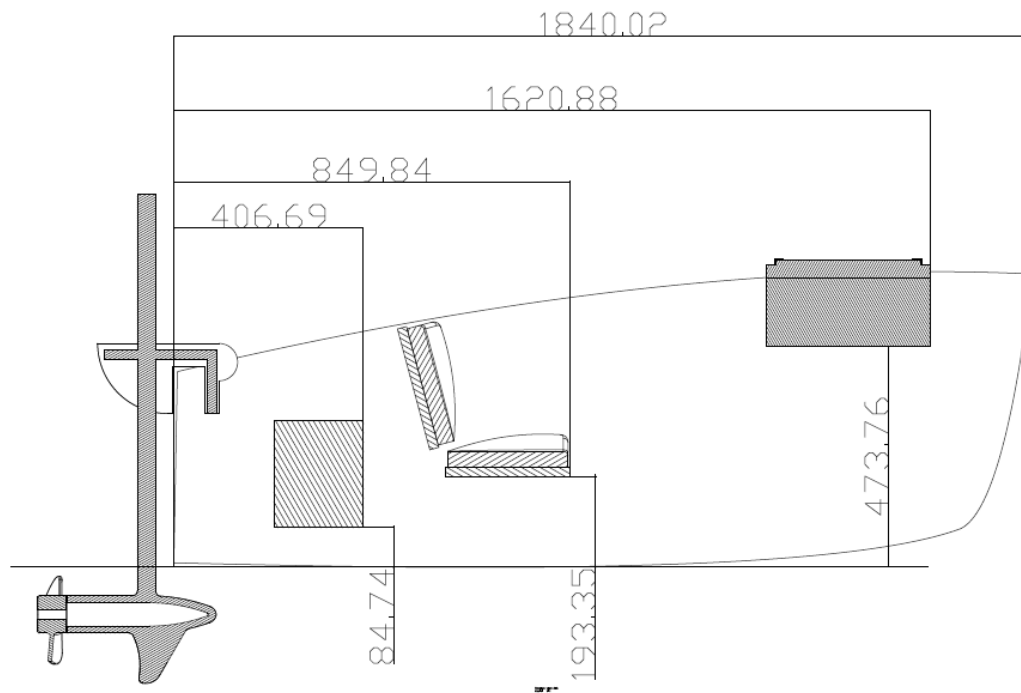


Ilustración A 18: Croquis de la disposición de los componentes del sistema propulsivo en el casco. Todas las cotas están en mm. (Fuente: elaboración propia)

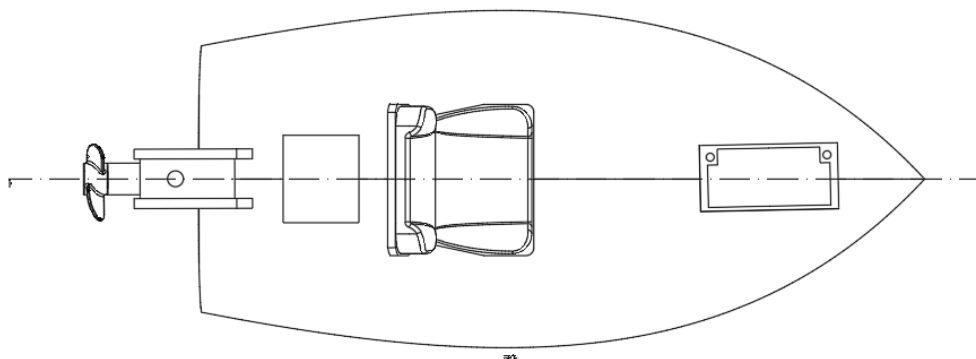


Ilustración A 19: Croquis de la disposición de los componentes del sistema propulsivo en el casco. (Fuente: elaboración propia)

A3. Anexo 3

A3.1 Recopilación de algunos motores y características de diferentes proveedores vistos

Newport vessels	P consumo máx. (W)	Empuje (N)	Voltage (V)	Corriente máx. (A)	Peso (kg)	Precio (€)
NV SERIES 55 lb	624	244,6	12	52	10,8	175
NV SERIES 62 lb	696	275,8	12	58	11,4	245
NV SERIES 86 lb	1152	382,5	24	48	12,3	335

Tabla A 5: Motores fueraborda eléctricos de corriente continua NV Series de Newport Vessels. (Fuente: elaboración propia)

Cloud Mountain	P consumo máx. (W)	Empuje (N)	Voltage (V)	Corriente máx. (A)	Peso (kg)	Precio (€)
55 lb	636	244,6	12	53	9,1	160
60 lb	684	266,9	12	57	10	165
86 lb	1164	382,5	24	48,5	10,4	200

Tabla A 6: Motores fueraborda eléctricos de corriente continua Cloud Mountain. (Fuente: elaboración propia)

Haswing outdoor	P consumo máx. (W)	Empuje (N)	Voltage (V)	Corriente máx. (A)	Peso (kg)	Precio (€)
Osapian 55 lb	660	244,6	12	55	8,6	190
Osapian 80 lb	840	355,8	24	35	12,8	250
Protruar 1.0	600	289,1	12	50	8,2	350
Protruar 2.0	960	378	24	40	8,3	395
Protruar G 3.0	1200	489,4	24	50	8,5	550

Tabla A 7: Motores fueraborda eléctricos de corriente continua Haswing Outdoor. (Fuente: elaboración propia)

Seamax	P consumo máx. (W)	Empuje (N)	Voltage (V)	Corriente máx. (A)	Peso (kg)	Precio (€)
SpeedMax 55 lb	624	244,6	12	52	10	265
SpeedMax 65 lb	732	289,1	12	61	10,8	290
SpeedMax 90 lb	1152	400,3	24	48	11,8	350

Tabla A 8: Motores fueraborda eléctricos de corriente continua Seamax. (Fuente: elaboración propia)

A3.2 Listado de baterías vistos en el proyecto y sus principales datos de funcionamiento

	Celdas	Tensión (V)	Capacidad (Ah)	Corriente máx (A) (5 sec)	Peso (kg)	Precio
Ritar RA12-33	6	12	33	330	10,2	87,20 €
Vision 6FM40-X	6	12	40	400	14,5	134,09 €
Ritar RA12-40	6	12	40	400	13	103,73 €
RS PRO 727-0408	6	12	55	660	16,5	195,13 €
RS PRO 537-5539	6	12	65	780	19,2	176,99 €
Panasonic LC-X1265P	6	12	65		23,5	266,30 €
Ritar DC12-65	6	12	70	970	19,5	124,47 €
Ritar DC12-75	6	12	80	750	23,5	136,60 €
Ultracell UC 86-12	6	12	86	900	22,3	146,45 €
Ritar DC12-80	6	12	90	800	22,7	148,48 €
Vision 6FM90TD-X	6	12	90	800	29	190,94 €
Ritar DC12-90	6	12	100	900	28	202,07 €
Kaise KBL 121000	6	12	100	900	29	244,94 €

Tabla A 9: Baterías y principales características de funcionamiento consideradas en el proyecto. (Fuente: elaboración propia)

A3.3 Información batería Ritar DC12-65 de 70Ah

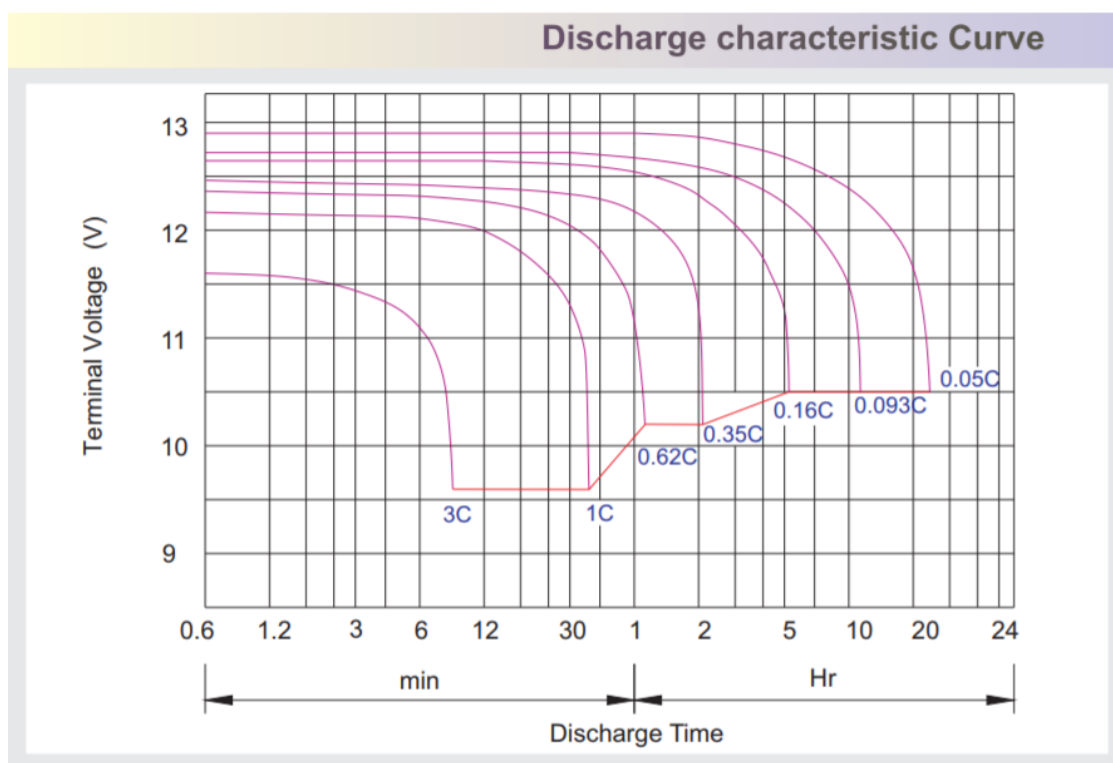


Ilustración A 20: Curvas de descarga para diferentes corrientes de descarga batería Ritar DC12-65 de 70Ah.

(Autosolar, Batería AGM 12V 70Ah RITAR)

